

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zvonimir Petković

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.

Student:

Zvonimir Petković

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Damiru Markučiću za upućivanje u područje računalne radiografije i osiguranje izvrsnih radnih uvjeta za obavljanje eksperimentalnog dijela rada. Također, zahvaljujem se i mag. ing. mech. Marku Rakvinu za iznimnu količinu pomoći kako s praktične, tako i s teoretske strane. Zahvalan sam i laborantu Tomislavu Kezele koji je svojom stručnošću osigurao efikasnu i kvalitetnu provedbu eksperimenata.

Zvonimir Petković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Zvonimir Petković**

Mat. br.: 0035163187

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj olovnih folija na kvalitetu digitalnog radiografskog zapisa kod računalne radiografije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of radiographic lead intensifying screens on image quality in computed radiography**

Opis zadatka:

Korištenje olovnih folija u konvencionalnoj industrijskoj radiografiji, kada se kao senzor koristi radiografski film, prilikom eksponiranja ispitnoga objekta energijama ionizirajućega zračenja u rasponu između 80 i 400 keV dovodi do poboljšanja kvalitete radiograma. Zbog karakterističnoga odaziva slikovnih ploča (eng. *Imaging Plates*), korištenih kao senzor zračenja u tehnici računalne radiografije (eng. *Computed Radiography – CR*), na dozu i energiju zračenja, kao i njihove konstrukcije, djelovanje olovnih folija nema istovjetni utjecaj na kvalitetu digitalnoga radiografskoga zapisa kao što je to slučaj kod radiografskoga filma. Stoga je u radu potrebno:

- opisati mehanizme djelovanja olovnih folija na senzore ionizirajućih zračenja (radiografski film i slikovnu ploču);
- provesti laboratorijska radiografska ispitivanja pomoću sustava za računalnu radiografiju pri različitim razinama energija ionizirajućega zračenja te za različite kombinacije debljina olovnih folija;
- na dobivenim digitalnim radiografskim zapisima odrediti kvantitativne pokazatelje kvalitete slike;
- analizom izmjerenih vrijednosti odrediti optimalnu kombinaciju olovnih folija pri određenoj energiji ionizirajućeg zračenja.

Zadatak zadan:

8. svibnja 2014.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

10. srpnja 2014.

Predviđeni datum obrane:

16., 17. i 18. srpnja 2014.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Sadržaj

1.	Uvod	3
2.	Fizika radiografije	4
2.1.	Nastanak rendgenskih zraka	4
2.2.	Nastanak gama zraka	5
2.3.	Aktivnost i vrijeme poluživota izotopa	5
2.4.	Priroda rendgenskih i gama zraka	6
2.5.	Interakcija gama i rendgen zraka s materijalom	9
2.5.1.	Fotoelektrični efekt	9
2.5.2.	Comptonov efekt	10
2.5.3.	Efekt stvaranja parova	11
2.6.	Penetracija rendgen i gama zraka	11
2.6.1.	Sloj poludebljine materijala	13
3.	Izvori zračenja	15
3.1.	Izvor rendgenskog zračenja	15
3.1.1.	Podjela rendgenskih cijevi s obzirom na izvedbu hlađenja	15
3.1.2.	Podjela rendgenskih cijevi s obzirom na oblik anode	17
3.1.3.	Podjela rendgenskih cijevi s obzirom na broj polova	18
3.1.4.	Izvori kilovoltnog napona	19
3.1.5.	Utjecaj električnog napona i struje cijevi na emitirano zračenje	20
3.1.6.	Efektivna veličina žarišta	21
3.2.	Izvori gama zračenja	22
4.	Filteri i folije	24
4.1.	Radiografski filteri	24
4.2.	Radiografske folije	25
4.2.1.	Olovne folije	25
4.2.2.	Čelične i bakrene folije	27

4.2.3.	Fluorescentne folije	28
4.2.4.	Fluorometalne folije	28
5.	Digitalna radiografija	29
5.1.	Računalna radiografija.....	30
5.1.1.	Slikovna ploča	31
5.1.2.	Dobivanje snimke.....	32
5.1.3.	Nedostaci slikovnih ploča	33
5.1.4.	Norme za računalnu radiografiju.....	35
6.	Slikovne ploče Kodak Industrex	37
6.1.	Oštrina	37
6.2.	Zadržavanje snimke	38
6.3.	Apsorpcija zračenja	39
6.4.	Emisija svjetlosti.....	40
7.	Praktični dio	41
7.1.	Eksperimentalni postav.....	41
7.2.	Digitalizacija slikovnih ploča	46
7.3.	Način analize radiograma	48
7.3.1.	Određivanje prostorne rezolucije	49
7.3.2.	Određivanje kontrasta	50
7.3.3.	Određivanje odnosa signal-šum (SNR).....	51
7.4.	Rezultati mjerenja i analize snimaka	54
7.4.1.	Analiza rezultata kontrasta	57
7.4.2.	Analiza rezultata prostorne rezolucije (BSR).....	58
7.4.3.	Analiza rezultata odnosa signal-šum.....	59
8.	Optimalne kombinacije olovnih folija.....	60
9.	Zaključak.....	61
10.	Literatura	62

Popis slika

Slika 2.1 – Bremsstrahlung zračenje	4
Slika 2.2 – Zračenje K-ljuske	5
Slika 2.3 – Elektromagnetski spektar	7
Slika 2.4 – Distribucija intenziteta zračenja rendgenskih zraka.....	7
Slika 2.5 – Spektralne linije radioaktivnih elemenata.....	8
Slika 2.6 – Odnos koeficijenta μ i energije zračenja na primjeru čelika.....	9
Slika 2.7 – Fotoelektrični efekt	10
Slika 2.8 – Comptonov efekt.....	11
Slika 2.9 – Stvaranje parova.....	11
Slika 2.10 – Odnos intenziteta homogenog zračenja i penetraciji	12
Slika 2.11 – Odnos intenziteta heterogenog zračenja i penetracije.....	13
Slika 2.12 – Utjecaj sloja poludebljine materijala na intenzitet zračenja.....	14
Slika 3.1 – Izvedba rendgenske cijevi s pasivnim hlađenjem	16
Slika 3.2 – Rendgenska cijev s rotirajućom anodom	16
Slika 3.3 – Bipolarna, usmjerena rendgenska cijev	17
Slika 3.4 – Panoramska, unipolarna rendgenska cijev sa šupljom anodom.....	17
Slika 3.5 – Izgled anode za panoramsko snimanje.....	18
Slika 3.6 – Unipolarna usmjerena rendgenska cijev	19
Slika 3.7 – Valni oblik napona na transformatoru	19
Slika 3.8 – Ispravljeni (istosmjerni) napon	19
Slika 3.9 – Utjecaj napona na spektar energija zračenja	20
Slika 3.10 - Utjecaj struje cijevi na spektar energija zračenja	21
Slika 3.11 – Efektivna veličina žarišta rendgenskog zračenja	22
Slika 3.12 – Sustav za radiografsko ispitivanje gama zračenjem	23
Slika 3.13 – Kapsula s radioaktivnim izotopom	23
Slika 4.1 – Uzorak snimljen bez filtera (lijevo) i s filterom (desno).....	24
Slika 4.2 – Raspršeno zračenje u predmetu ispitivanja.....	25
Slika 4.3 – Snimka bez olovni folija (lijevo) i s njima (desno).....	27
Slika 4.4 – Snimka uz dobro prijanjanje folije na film (lijevo) i loše (desno)	27
Slika 5.1 – Slikovna ploča (lijevo) i film (desno) pri stepeničastom uzorku	30
Slika 5.2 – Reakcije filma i slikovne ploče na zračenje.....	31
Slika 5.3 – Slojevi slikovne ploče	31
Slika 5.4 – Put od slikovne ploče do prikaza na računalu.....	32

Slika 5.5 – Raspršenje incidentne skenirajuće laserske zrake u fosfornom sloju	33
Slika 5.6 – Odnos signal-šum (SNR) i kontrast-šum	34
Slika 5.7 – Smanjenje oštine s obzirom na debljinu fosfornog sloja	34
Slika 5.8 – Klase slikovnih ploča i metalnih folija za računalnu radiografiju čelika te legura nikla i bakra.....	35
Slika 5.9 – Zahtijevana prostorna rezolucija s obzirom na energiju zračenja i debljinu stjenke	36
Slika 6.1 – Razlika u oštini slikovnih ploča.....	38
Slika 6.2 – Zadržavanje izvornog (snimljenog) signala	39
Slika 6.3 – Apsorpcija zračenja za Industrex slikovne ploče u ovisnosti o naponu rendgena .	40
Slika 6.4 – Emisija svjetlosti Industrex slikovnih ploča (HR i GP).....	40
Slika 7.1 – Rendgenska cijev na nosaču postavljena na 1 m visine.....	41
Slika 7.2 – Upravljačka jedinica rendgenske cijevi	42
Slika 7.3 – Detalj upravljačke jedinice s regulatorima za vrijeme, napon i struju.....	42
Slika 7.4 – Odabir debljine uzorka prema naponu rendgenske cijevi (prema normi).....	43
Slika 7.5 – Duplex indikator prema normi EN 462-5	44
Slika 7.6 – Slikovna ploča na koju je smješten ispitni uzorak i duplex indikator.....	45
Slika 7.7 – Skener VMI 5100MS	46
Slika 7.8 – Softver za skeniranje slikovne ploče prilikom skeniranja	48
Slika 7.9 – Određivanje prostorne rezolucije radiograma.....	49
Slika 7.10 – Primjer nelinearizirane slike	51
Slika 7.11 – Linearizirana slika.....	52
Slika 7.12 – Upisivanje vrijednosti aperture	53
Slika 7.13 – Upisivanje podatka za prostornu rezoluciju.....	53
Slika 7.14 – Prikaz mjerenja odnosa signal-šum.....	54
Slika 7.15 – Grafikon kontrasta.....	57
Slika 7.16 – Stupčasti dijagram prostorne rezolucije	58
Slika 7.17 – Grafički prikaz odnosa signal-šum	59

Popis tablica

Tablica 2.1 – Prosječne vrijednosti sloja poludebljine materijala u ovisnosti o izotopu	14
Tablica 3.1 - Udio toplinske energije (vrijednosti su približne)	15
Tablica 4.1 – Skraćenje vremena ekspozicije	28
Tablica 6.1 – Tehničke karakteristike slikovnih ploča.....	37
Tablica 7.1 Odgovarajuća prostorna rezolucija za odgovarajući element, prema EN 462-5 ...	44
Tablica 7.2 – Plan pokusa	46
Tablica 7.3 – Specifikacije skenera VMI 5100MS	47
Tablica 7.4 – Rezultati kontrasta i rezolucije za 100 kV	54
Tablica 7.5 – Rezultati odnosa signal-šum za 100 kV	55
Tablica 7.6 – Rezultati kontrasta i rezolucije za 175 kV	55
Tablica 7.7 – Rezultati odnosa signal-šum za 175 kV	55
Tablica 7.8 – Rezultati kontrasta i rezolucije za 250 kV	56
Tablica 7.9 - Rezultati odnosa signal-šum za 250 kV	56

Popis fizikalnih veličina i mjernih jedinica

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
U	V	električni napon
E	eV	energija elektrona
l	m	duljina
t	s	vrijeme
I	A	električna struja
λ	nm	valna duljina
c	km/s	brzina svjetlosti
μ		linearni koeficijent prigušenja
τ		koeficijent prigušenja fotoelektričnog efekta
σ_S		koeficijent prigušenja Comptonovog efekta
π		koeficijent prigušenja efekta stvaranja parova
p	Pa	tlak
T	K	temperatura
m	kg	masa
v	m/s	brzina

SAŽETAK

U ovome radu bilo je obrađivano područje računalne radiografije, koje je jedna od metoda nerazornih ispitivanja. Kroz teoretski dio rada objašnjena je priroda, kao i procesi nastanka zračenja. S obzirom da je zadatak bio eksperimentalno istražiti utjecaj radiografskih folija na kvalitetu digitalnog radiografskog zapisa, proveden je eksperimentalni dio. Korištene su razne kombinacije olovnih folija te energija zračenja. Dobiveni digitalni zapisi su analizirani putem računalnog softvera te su naposljetku prikazani određenim grafičkim prikazima. Na osnovu dobivenih rezultata i uz pomoć grafičkih prikaza, izvučeni su zaključci o tome koje su kombinacije radiografskih folija i razina zračenja najpovoljniji za dobivanje radiografskog zapisa što bolje kvalitete.

Ključne riječi: računalna radiografija, nerazorna ispitivanja, radiografske folije, kvaliteta digitalnog radiografskog zapisa

SUMMARY

The area of interest in this diploma thesis was computed radiography, which is a method of non-destructive testing. Through theoretic part of the thesis, the nature and origin of radiation was explained. Since the task was to investigate the effects of radiographic screens and different energies of radiation on the quality of obtained digital image, the experimental part was carried out. Lead screens were varied by thickness and radiation energy was varied by its intensity. Obtained digital images were analysed through specialised software and finally, results were demonstrated by means of graphical representation. Based on obtained results, and based on graphical representations, conclusions were drawn about which of the combinations of lead screen thickness and radiation energies were optimal for obtaining digital radiographic image of the highest possible quality.

Key words: computed radiography, non-destructive testing, radiographic screens, quality of digital radiographic image

1. Uvod

Upotreba digitalnih zapisa jedna je od obilježja današnjeg doba sveobuhvatne informatizacije. Nije zaobišla niti područje strojarstva koje se bavi nerazornim ispitivanjima, pa tako na području radiografskog ispitivanja postoje dvije metode koje koriste digitalne zapise. To su digitalna radiografija, te računalna radiografija koja je područje koje se u ovom radu obrađivalo. Računalna radiografija još uvijek koristi fizički medij za prijenos slike do skenera gdje se slika pretvara u digitalnu, odnosno gdje se vrši analogno-digitalna pretvorba.

Kao što je to slučaj s klasičnom radiografijom, razne varijable pri provođenju ispitivanja mogu imati kao rezultat vrlo raznolike i ponekad ne zadovoljavajuće rezultate. Tema ovog rada je upravo ispitivanje utjecaja jednog od glavnih faktora pri radiografskom ispitivanju, a to su radiografske folije. Spomenute mogu biti izrađene od raznih materijala, ali su se kroz povoljna svojstva, prihvatljivu cijenu i izvrsne rezultate kao primarne folije nametnule one olovne koje su upotrebljavane prilikom eksperimentalnog dijela rada.

U prvome dijelu rada ukratko je prikazan teoretski dio koji se uvelike oslanja na fizikalne osnove same radiografije. Shodno temi rada, korisno je poznavati i razumjeti na koji način dolazi do snimanja gama ili rendgenskim zrakama, i do kakvih interakcija može doći između materijala i snopa zračenja u ovisnosti o parametrima ispitivanja.

Računalna radiografija podrazumijeva korištenje ili rendgenskih cijevi ili izotopa prirodnih elemenata. U oba slučaja dolazi do emitiranja zračenja malih valnih duljina, no svaki od izvora ima svoje distinktivne karakteristike. Ipak, zbog toga što je za potrebe ovog rada korišten izvor zračenja bila rendgenska cijev, težište je s teoretske strane uvelike stavljeno na taj izvor zračenja.

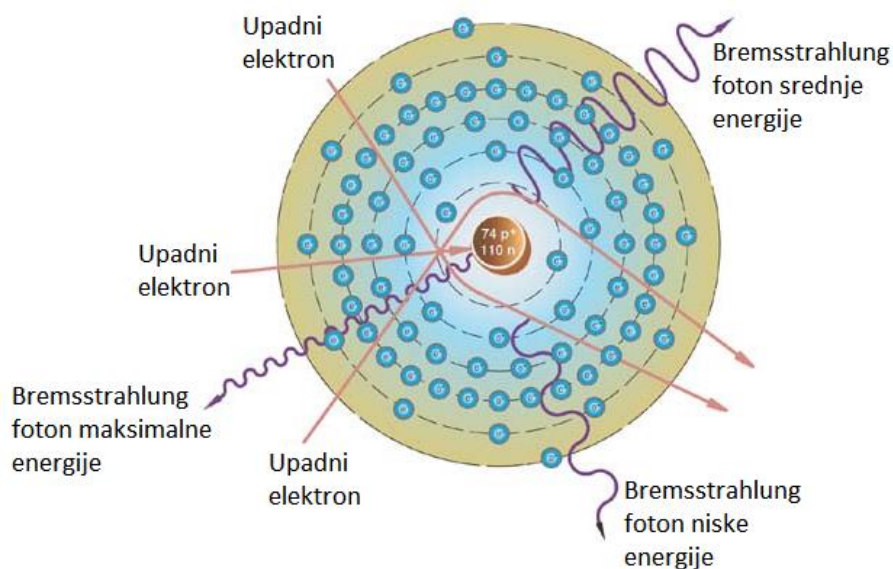
Naposljetku, obrađene su i teme koje su bile ključne za ovaj rad (radiografske folije i opis same računalne radiografije), te je na kraju provedeno eksperimentalno ispitivanje koje je ekstenzivno potkrijepljeno odgovarajućim grafičkim prikazima.

2. Fizika radiografije

2.1. Nastanak rendgenskih zraka

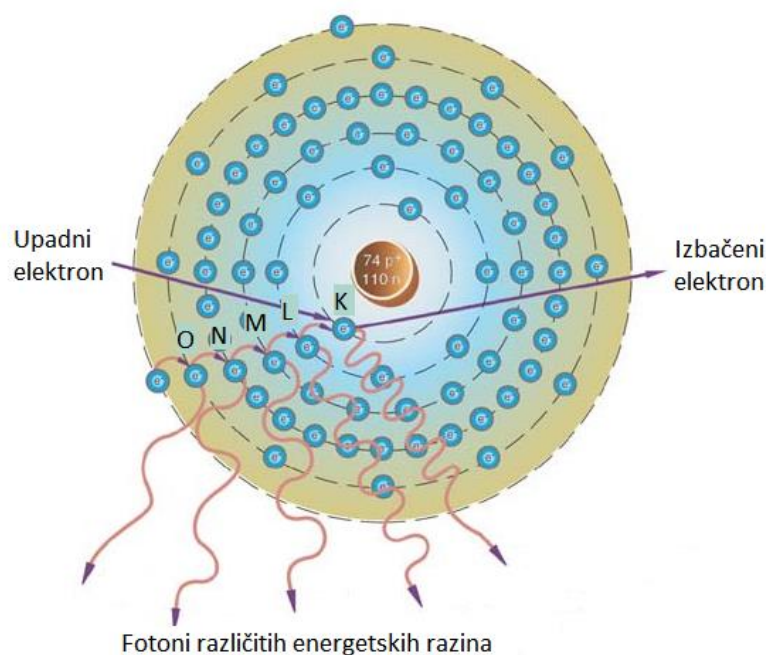
Na atomskoj razini, postoje dva procesa kojima se stvaraju rendgenske zrake, odnosno fotoni rendgenskog zračenja. Ti procesi su Bremsstrahlung (njem. zračenje kočenja) i zračenje K-ljuske koje se odnosi na energetska razinu elektrona.

Bremsstrahlung nastaje kao rezultat sudara elektrona koji su u vakuumskoj cijevi ubrzani na brzine od preko 100 000 kilometara u sekundi (pri 30 kV), i atoma metala (najčešće volframa). S obzirom na zakon očuvanja energije, velika energija udarajućeg elektrona nije izgubljena već se pretvara u foton zračenja. Dobiveno zračenje ima kontinuirani spektar energija (od nekoliko keV pa sve do maksimalnih iznosa od nekoliko stotina MeV) ovisno o mjestu sudara elektrona i atoma. Tako širok spektar je nepoželjan u radiografiji pa se iz njega raznim filterima uklanjaju fotoni nižih energija.



Slika 2.1 – Bremsstrahlung zračenje [1]

Zračenje K-ljuske dobilo je naziv prema najnižoj energetskej razini (ljusci) elektrona u atomu. Nastaje kada elektron velike brzine udara u atom metala i pritom izbaci elektron iz njegove K-ljuske. Ostali elektroni tada padaju za jednu razinu energije kako bi popunili praznu ljusku, a energija koju pritom gube pretvorena je u fotone zračenja. Ovakvo zračenje je intenzivnije od bremsstrahlunga, a dobiveni foton zračenja ima samo jednu valnu duljinu, a ne cijeli spektar. Međutim, bremsstrahlung je dominantan oblik zračenja kod rendgenskog zračenja.



Slika 2.2 – Zračenje K-ljuske [1]

2.2. Nastanak gama zraka

Za razliku od rendgenskih zraka, za gama zrake se može reći da nastaju prirodnijim putem. Gama zrake emitira izotop nekog elementa (najčešće iridij-192 ili kobalt-60) tijekom svog radioaktivnog raspada. Takav atom ima nestabilnu jezgru koja tijekom svog radioaktivnog raspada spontano prelazi s više energije na nižu, i za vrijeme tog „skoka“ emitira gama zraku. Radioaktivnost nekog elementa uključuje odašiljanje ne samo gama, već beta i alfa čestica koje nisu od interesa jer nisu elektromagnetske prirode (sastoje se samo od električki nabijenih čestica) i ne penetriraju materijal toliko dobro kao gama zrake.

2.3. Aktivnost i vrijeme poluživota izotopa

Nestabilna priroda i konstantno mijenjanje energije izotopa koji se koriste za radiografska ispitivanja su doveli do kvantitativnog definiranja njihove radioaktivnosti u nekom trenutku.

Tako je prema SI sustavu mjernih jedinica definiran bekerel (Bq) kao aktivnost količine radioaktivnog materijala u kojoj dolazi do raspada jedne atomske jezgre u sekundi. Praktično je to jedinica malog iznosa pa se često koristi kiri (Ci) koji iznosi $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

Definira se i specifična aktivnost, kao broj Ci ili Bq po jedinici mase ili volumena i obrnuto je proporcionalna fizičkoj veličini zračenja. Veća specifična aktivnost praktično znači da se izvor zračenja može smjestiti bliže filmu čime se povećava oštrina slike.

Aktivnost izotopa naravno nije konstantna tijekom vremena jer izotop gubi energiju zbog radioaktivnog raspada. Vrijeme nakon kojeg će izotop imati 50% svoje izvorne aktivnosti je definirano kao vrijeme poluživota izotopa. Za najčešće korištene izotope to vrijeme iznosi 74 dana za iridij-192 i 5,3 godina za cobalt-60.

Preostala količina aktivnosti se može izračunati preko jednadžbe:

$$f_D = 0,5^{\frac{t}{L_H}}$$

Gdje je:

f_D – preostala količina aktivnosti u odnosu na početnu aktivnost

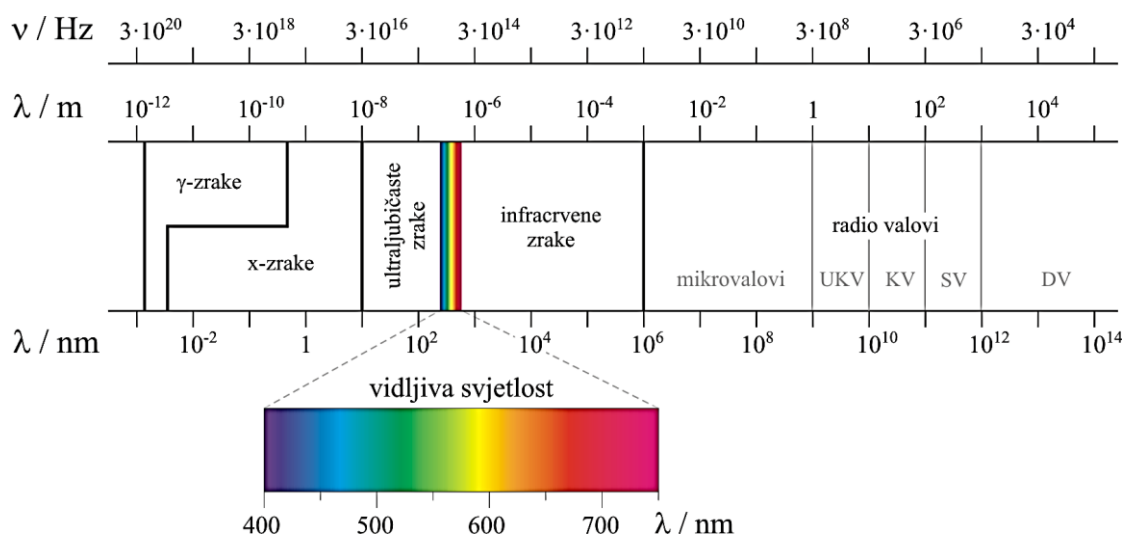
t – proteklo vrijeme u vremenskim jedinicama

L_H – poluživot u vremenskim jedinicama

2.4. Priroda rendgenskih i gama zraka

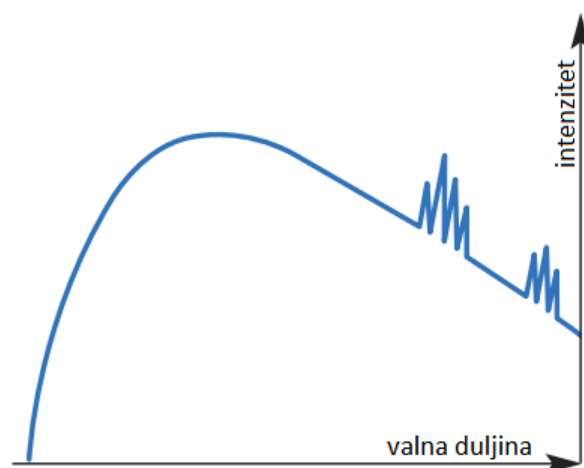
Rendgenske (X) i gama (γ) zrake su EM valovi, odnosno imaju komponente električnog i magnetskog polja koje međusobno osciliraju. Razlikuju se samo u načinu nastajanja, a u mediju putuju pravocrtno brzinom svjetlosti, te njihov pravac prostiranja ne može biti znatno promijenjen pri nailasku na prepreku. Osim što ih se opisuje kao valove, mogu se razmatrati i kao čestice bez mase; odnosno paketi energije (fotoni). Karakteriziraju se prema brzini, frekvenciji i valnoj duljini.

Energija ovih zraka proteže se kroz spektar od 100 eV do 100 MeV, odnosno valne duljine su tipično u rasponu od 0,01 nm do 0,01 pm. Zbog vrlo malih valnih duljina mogu (uz djelomičnu apsorpciju) prolaziti kroz tvar, te ju pritom ionizirati (izbaciti elektrone iz atoma).



Slika 2.3 – Elektromagnetski spektar [2]

Spektar zračenja rendgenskih zraka je heterogen, odnosno sadrži veliki broj različitih valnih duljina. Moguće je opaziti vrhove spektra koji su karakteristični za ispitivani materijal (Slika 2.4).



Slika 2.4 – Distribucija intenziteta zračenja rendgenskih zraka [3]

Prikazani spektar je tipičan i općenit, dok izgled stvarnog spektra ovisi o raznim utjecajnim faktorima i može izgledati nešto drugačije. Glavni utjecajni faktor na oblik spektra je energija elektrona koji udaraju u predmet ispitivanja. Međutim postoje i drugi faktori: materijal od kojeg je načinjen otvor na rendgenskoj cijevi, oblik električne struje napajanja rendgenske cijevi (ispravljena ili neispravljena) i oblik električnog napona napajanja.

Općenito se za spektar rendgenskih zraka najmanja valna duljina izračunava prema Duane-Huntovoj formuli:

$$\lambda_{min} = \frac{1,234}{U}$$

Gdje je:

λ – valna duljina u nanometrima

U – napon u kilovoltima

Energija elektrona koja definira jednu valnu duljinu izražena je Planckovom jednadžbom:

$$E = h \times v \quad \text{te} \quad \lambda \times f = c$$

Gdje je:

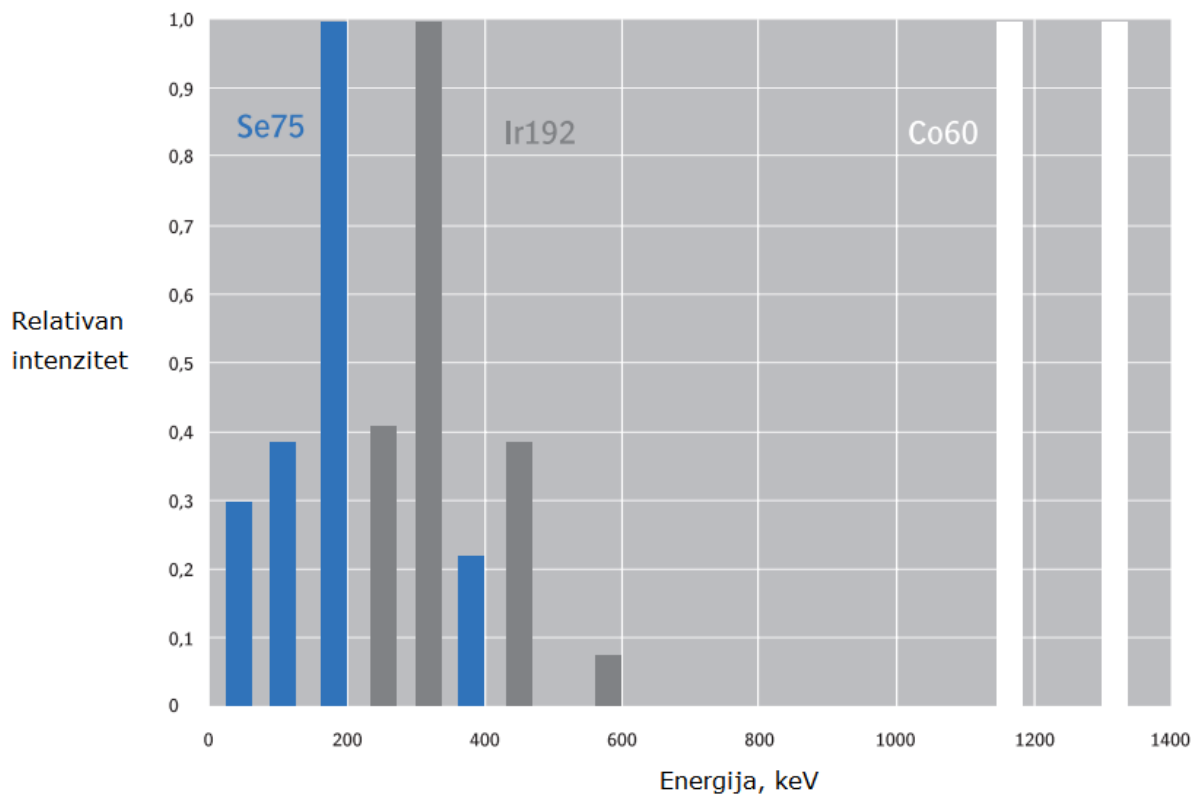
E – energija elektrona; eV

h – Planckova konstanta

f – frekvencija; Hz

c – brzina svjetlosti (brzina elektromagnetskog vala); 300 000 km/s

Za razliku od rendgenskih zraka, čija je energija distribuirana kroz kontinuirani spektar, gama zrake su distribuirane kao spektralne linije pa je moguće uočiti distinktivne energije s pripadajućim intenzitetima zračenja (Slika 2.5).



Slika 2.5 – Spektralne linije radioaktivnih elemenata [3]

2.5. Interakcija gama i rendgen zraka s materijalom

Prilikom penetracije materijala, dolazi do prigušenja, odnosno slabljenja zračenja. Efekt prigušenja je najlakše opisati linearnim koeficijentom prigušenja μ :

$$\mu = \tau + \sigma_S + \pi$$

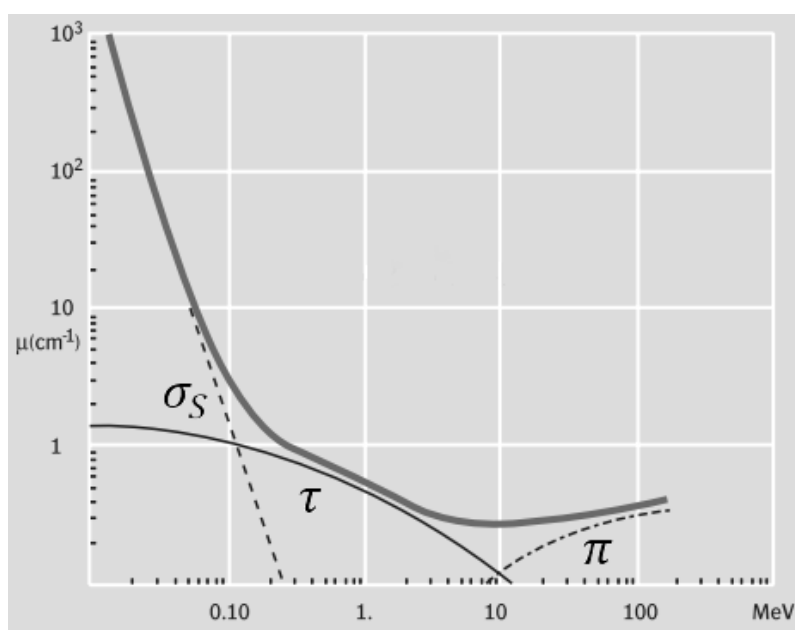
Gdje je:

μ – linearni koeficijent prigušenja

τ – prigušenje zbog fotoelektričnog efekta

σ_S – prigušenje zbog Comptonovog efekta

π – prigušenje zbog efekta stvaranja parova



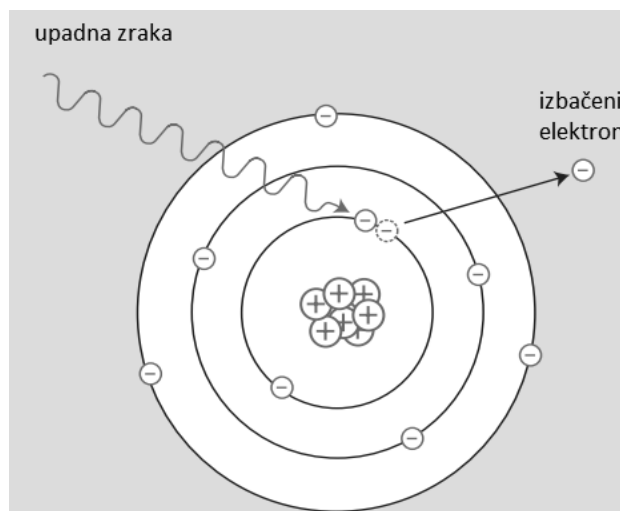
Slika 2.6 – Odnos koeficijenta μ i energije zračenja na primjeru čelika [3]

Evidentno je da linearni koeficijent prigušenja ovisi o energiji zračenja, ali i o tri različite pojave koje se zbivaju pri interakciji zračenja s materijalom o kojima će biti riječi u narednom tekstu.

2.5.1. Fotoelektrični efekt

Prva od tri vrste interakcije je fotoelektrični efekt. On nastaje prilikom sudara fotona relativno niske energije s atomom materijala pri čemu mu predaju svu svoju energiju. Kao posljedica tog sudara, može se dogoditi da elektron bude izbačen iz atoma materijala, čime se taj atom ionizira; ili se može dogoditi „podizanje“ elektrona iz niže u višu elektronsku ljusku. Podizanje energetskog nivoa elektrona dovodi do fluorescencije, odnosno emitiranja svjetla.

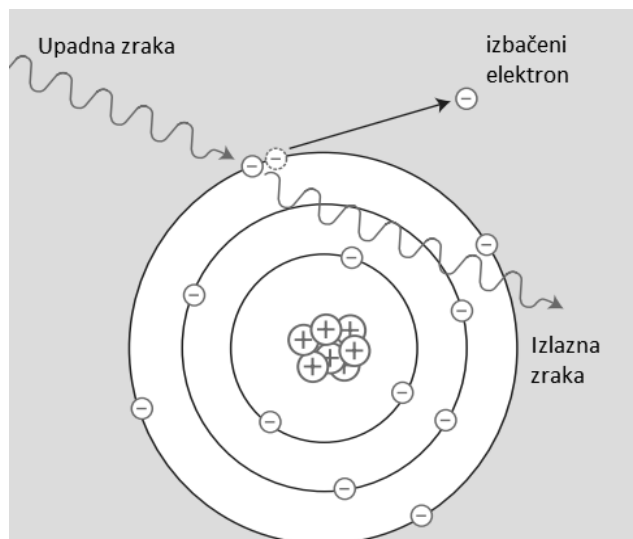
Fotoelektrični efekt je zapazio prvo Hertz (19.st.), a potom je Einstein za svoje objašnjenje tog efekta dobio Nobelovu nagradu 1921. godine. Razumijevanjem fotoelektričnog efekta je započela tzv. kvantna revolucija.



Slika 2.7 – Fotoelektrični efekt [3]

2.5.2. Comptonov efekt

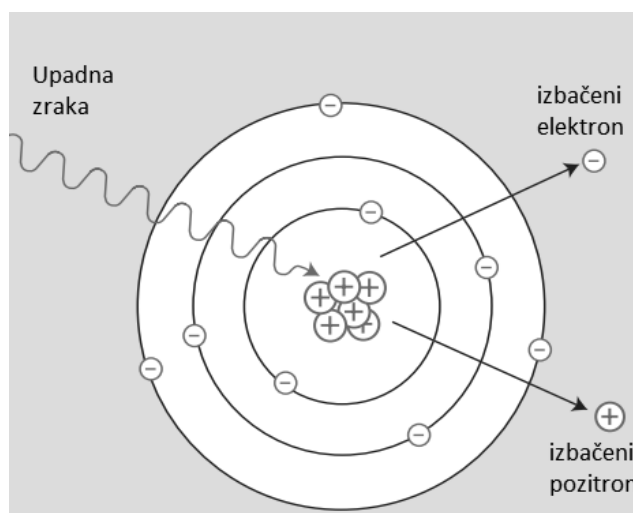
Nazvan prema američkom fizičaru A.H. Comptonu koji je za to otkriće dobio Nobelovu nagradu 1927. godine, Comptonov efekt opisuje interakciju fotona relativno visokih energija (100 keV do 10 MeV) i atoma sa slabo vezanim ili slobodnim elektronima vanjskih ljusaka. Iako je vrlo sličan fotoelektričnom efektu, u ovom slučaju nakon sudara i izbacivanja elektrona – foton predaje dio svoje energije (zračenje slabi) i mijenja svoju putanju kretanja. Putanja može poprimiti bilo koji smjer, pa čak i suprotan smjeru upadne zrake (eng. back-scatter); što se koristi na primjer kod električnog pretražnog mikroskopa (SEM).



Slika 2.8 – Comptonov efekt [3]

2.5.3. Efekt stvaranja parova

Ova pojava je karakteristična za vrlo visoke razine energije (iznad 1 MeV). Fotoni se sudaraju s atomima na način da dolaze u električno polje jezgre atoma gdje bivaju pretvoreni u elektron i pozitron (čestica antimaterije). S obzirom na prirodu antimaterije, ovakav par nakon 10^{-9} sekunde doživi uništenje koje rezultira emitiranjem dvije gama zrake energije 511 keV, suprotnih smjerova.



Slika 2.9 – Stvaranje parova [3]

2.6. Penetracija rendgen i gama zraka

Svojstvo penetracije zračenja se izražava kroz tzv. tvrdoću zračenja koja je obrnuto proporcionalna valnoj duljini. Za zračenje male valne duljine se tako može reći da je vrlo tvrdo,

odnosno da ima veliku penetraciju materijala. S obzirom na izvore zračenja, to znači da je zračenje tvrđe što je veći napon u rendgenskoj cijevi ili što je veća aktivnost izotopa.

Intenzitet zračenja I koje je penetriralo kroz materijal debljine t se opisuje kroz Zakon prigušenja koji glasi:

$$I = I_0 \times e^{-\mu d}$$

Gdje je:

I – intenzitet zračenja pri ulazu u materijal

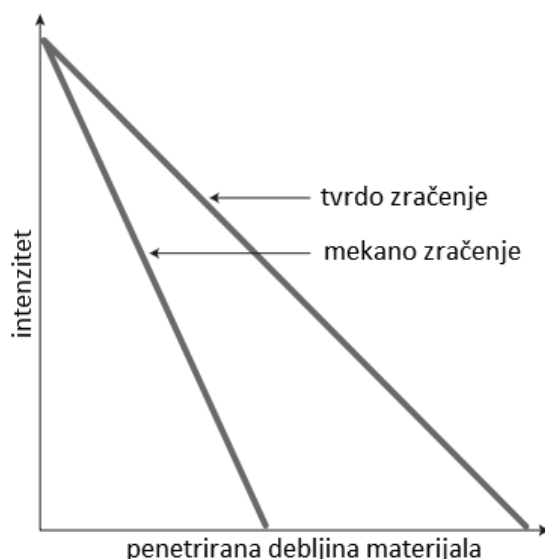
I_0 – intenzitet zračenja pri izlazu iz materijala

e – prirodni logaritam

μ – linearni koeficijent prigušenja

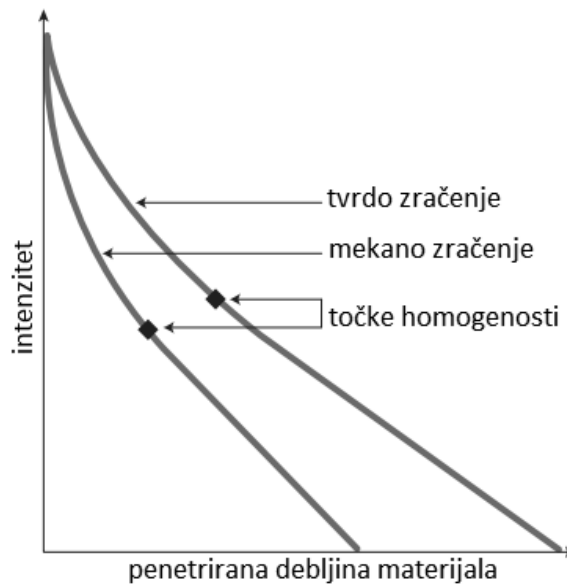
d – debljina materijala

Penetracija idealnog homogenog zračenja grafički se može prikazati kao pravac čiji nagib ovisi o tvrdoći zračenja, pa se tako zračenje manje tvrdoće predstavlja pravcem većeg nagiba.



Slika 2.10 – Odnos intenziteta homogenog zračenja i penetraciji [3]

Puno učestaliji slučaj je heterogeno zračenje koje u svom spektru ima dosta zračenja niže tvrdoće (niže energije). Takvo zračenje na početku penetracije ima oblik strme krivulje sve dok ne dođe do tzv. točke homogenosti, nakon koje se dalje ponaša kao homogeno zračenje.



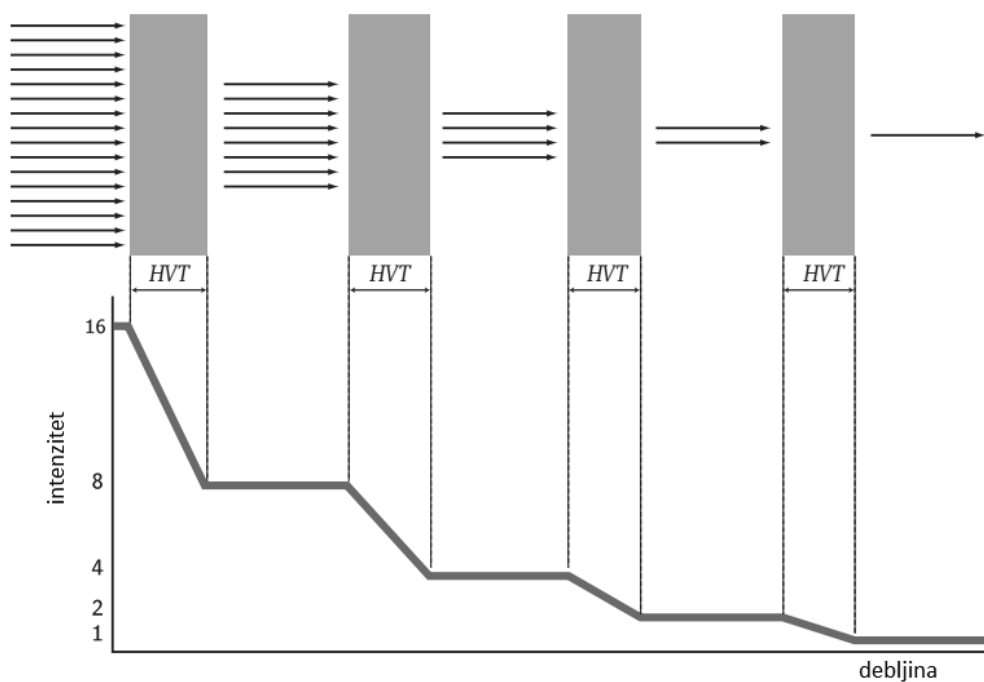
Slika 2.11 – Odnos intenziteta heterogenog zračenja i penetracije [3]

S prethodnih dijagrama se jasno vidi da metal relativno velike debljine efektivno filtrira mekano zračenje, odnosno zračenje niske energije. Stoga se u pri radiografskom ispitivanju namjerno smještaju slojevi metala između ispitivanog predmeta i izvora zračenja ili između ispitivanog predmeta i filma.

U slučaju kada se sloj metala smješta između ispitivanog predmeta i izvora zračenja, smanjuje se pretjerani kontrast. Najčešće se provodi pri ispitivanju predmeta vrlo varijabilne debljine. U drugom slučaju, kada se sloj metala smješta između ispitivanog predmeta i filma - povećava se kontrast radiografske snimke jer se izbjegava prolazak zračenja nastalog zbog Comptonovog efekta (raspršeno zračenje).

2.6.1. Sloj poludebljine materijala

Linearni koeficijent prigušenja nije praktičan jer ga je teško pamtiti i njime računati, pa se uvela veličina pod nazivom sloj poludebljine materijala. Taj sloj predstavlja potrebnu debljinu materijala da bi se intenzitet upadnog monokromatskog zračenja smanjio na polovicu njegovog početnog iznosa. Ovdje se opet nailazi na problem definiranja sloja s ovisnošću o tome je li zračenje homogeno ili heterogeno. Problem je praktično riješen na način da se u industriji vrijednost sloja poludebljine izražava kroz srednju vrijednost za pojedini materijal. Grafički je prikazan kao kratica HVT (half-value thickness), odnosno numerički tablicom na sljedećoj stranici.



Slika 2.12 – Utjecaj sloja poludebljine materijala na intenzitet zračenja [3]

Tablica 2.1 – Prosječne vrijednosti sloja poludebljine materijala u ovisnosti o izotopu [3]

Izotop	Prosječna energija u MeV	HVT (u milimetrima olova)
Cezij-137	0,66	8,4
Kobalt-60	1,25	13
Iridij-192	0,45	2,8
Selenij-75	0,32	2

3. Izvori zračenja

Iako nisu jedina oprema koja je bitna pri radiografskom ispitivanju, izvori zračenja su jedna od najbitnijih komponenata sustava za radiografsko ispitivanje.

3.1. Izvor rendgenskog zračenja

Mjesto na kojem nastaju rendgenske zrake je dosad već spomenuta rendgenska cijev. Radi se o staklenoj ili keramičkoj cijevi koja sadrži pozitivnu i negativnu elektrodu. Pozitivna elektroda se naziva anodom, a negativna katodom. Unutrašnjost cijevi je pod vrlo visokim vakuumom (10^{-9} hPa), pa se ponekad u tekstu naziva i vakuumskom cijevi. [3]

Katoda se sastoji od žarne niti (filamenta), čašice za fokusiranje i napajanja. Izvor napajanja katode je relativno niskog napona u odnosu na napone koji se koriste za proces dobivanja rendgenskih zraka. Njegova zadaća je propuštati kroz filament struju od nekoliko ampera, kako bi se filament zagrijavao i sadržavao povećani broj elektrona koji se dalje koriste. Većom temperaturom filameta se dobiva i veći broj elektrona koji čine tzv. struju cijevi. Ona obično poprima miliamperske iznose, i kontrolirana je transformatorom varijabilnog napona. Iako se filament ne zagrijava niti približno kao anoda, upravo je njegovo potencijalno pregaranje i iskrenje prema anodi razlog zašto se rendgenska cijev stavlja pod uvijete vakuuma.

Anoda je pozitivna elektroda koju u suštini sačinjava materijal s kojim se sudaraju elektroni katode, odnosno anoda je mjesto nastanka rendgenskih zraka. Kao materijal, obično se koristi volfram, i to uglavnom zbog svojeg visokog tališta. Visoka temperatura tališta od $3400\text{ }^{\circ}\text{C}$ je neophodna, jer se iznimna količina kinetičke energije elektrona pretvara u toplinsku energiju.

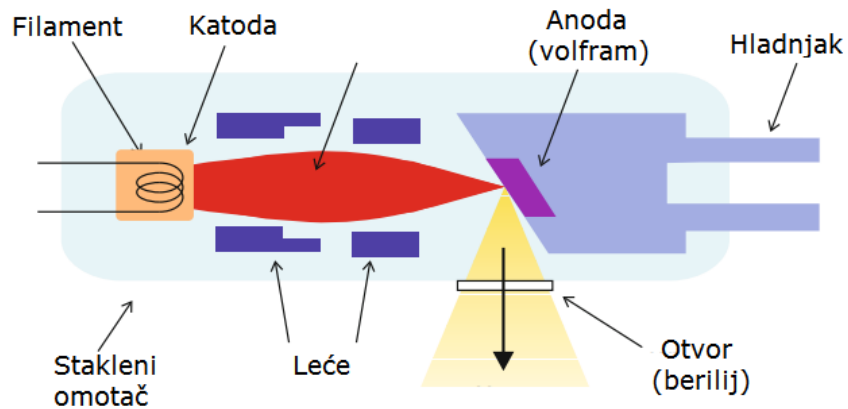
Tablica 3.1 - Udio toplinske energije (vrijednosti su približne) [3]

Energija	Pretvoreno energije u toplinu
30 keV	99,9 %
200 keV	99 %
35 MeV	60 %

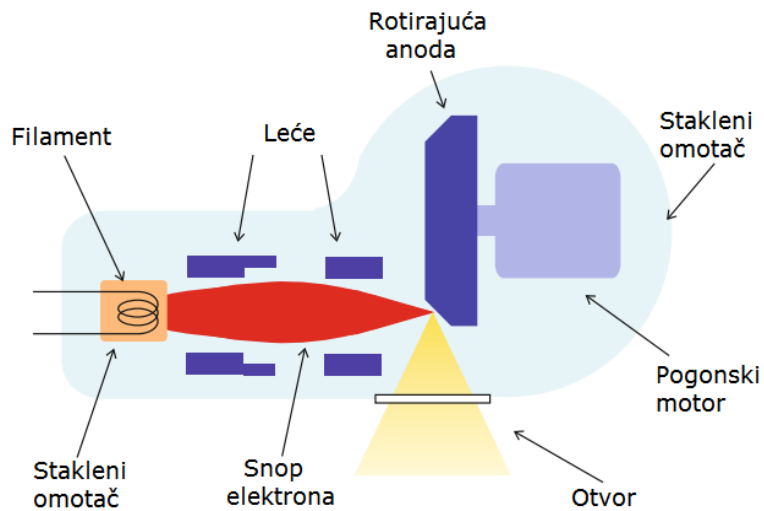
3.1.1. Podjela rendgenskih cijevi s obzirom na izvedbu hlađenja

1. Uljem hlađena rendgenska cijev – cijela cijev je uronjena u ulje kako bi se poboljšalo odvođenje topline

2. Plinom hlađena rendgenska cijev – cijev je okružena plinom koji iako ne odvodi toliko dobro toplinu kao ulje, i dalje je prikladan za niže napone
3. Klasična rendgenska cijev bez prinudnog hlađenja
4. Rendgenska cijev s rotirajućom anodom – anoda je rotirajući disk od volframa, bakra ili srebra koji rotira dovoljno velikom brzinom da njegova površinska temperatura ne može dosegnuti kritičnu vrijednost pri kojoj bi došlo do oštećenja površine (pitting)



Slika 3.1 – Izvedba rendgenske cijevi s pasivnim hlađenjem [4]

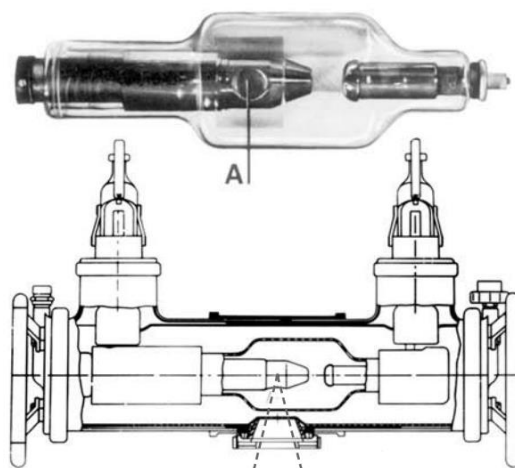


Slika 3.2 – Rendgenska cijev s rotirajućom anodom [4]

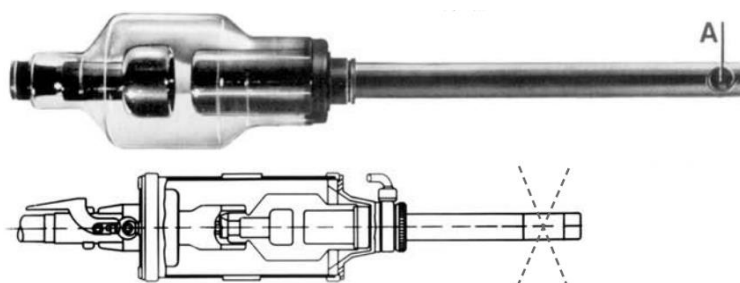
3.1.2. Podjela rendgenskih cijevi s obzirom na oblik anode

Prema obliku anode, rendgenske cijevi se dijele na usmjerene i panoramske cijevi.

Usmjerene cijevi emitiraju zračenje samo u jednome smjeru, a panoramske emitiraju zračenje u krug, pa su naziv dobile prema panoramskoj (360°) slici.



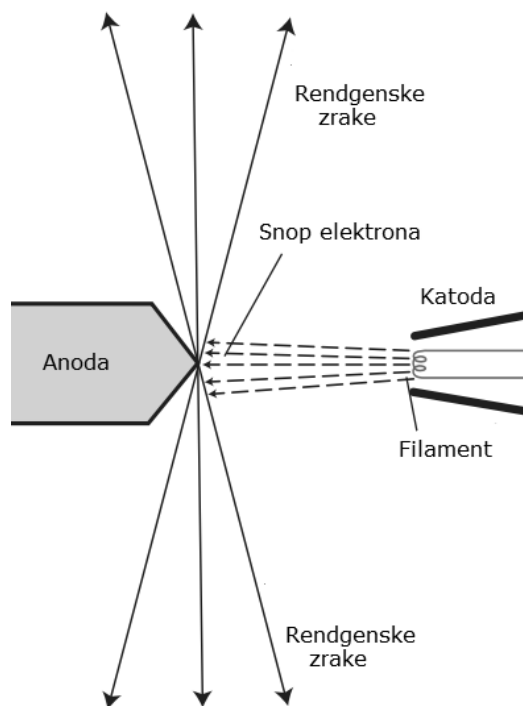
Slika 3.3 – Bipolarna, usmjerena rendgenska cijev [3]



Slika 3.4 – Panoramska, unipolarna rendgenska cijev sa šupljom anodom [3]

Panoramske cijevi sa šupljom anodom, poput prikazane na slici, koriste se za radiografsko snimanje cijevi ili spremnika. Najčešće se radi o kružnim zavarima, pa je neophodno da snimka pokriva punih 360° .

Postoje još i mikro-fokalne panoramske cijevi u kojima se elektronski snop fokusira pomoću magnetske ili elektrostatičke leće, kako bi se dobilo što manje žarište. Prednost im je vrlo oštra radiografska snimka, ali se zbog pregrijavanja anoda često mora mijenjati.

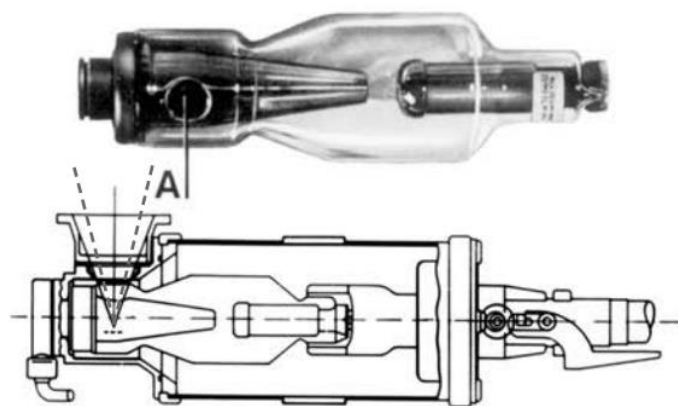


Slika 3.5 – Izgled anode za panoramsko snimanje

3.1.3. Podjela rendgenskih cijevi s obzirom na broj polova

Rendgenske cijevi dijele se i prema broju polova, pa tako postoje bipolarne i unipolarne cijevi. Bipolarne cijevi (Slika 3.3) imaju dvije točke uzemljenja: na anodi i na katodi. Tako je električni potencijal u odnosu na zemlju i na anodi i na katodi jednak polovici napona cijevi što olakšava konstrukciju cijevi sa stajališta električne izolacije. Problem je što se zbog simetrije izlazni otvor zračenja mora postaviti na sredinu cijevi.

Unipolarne cijevi imaju samo jednu točku uzemljenja (na anodi), i zbog toga su bitno kraće od bipolarnih. Zbog toga je mnogo lakše ohladiti anodu, a i izlazni otvor zračenja se može postaviti asimetrično što može biti od praktične koristi.



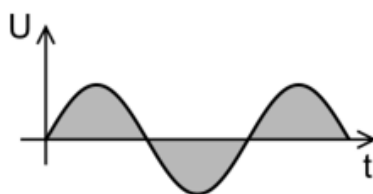
Slika 3.6 – Unipolarna usmjerena rendgenska cijev [3]

3.1.4. Izvori kilovoltnog napona

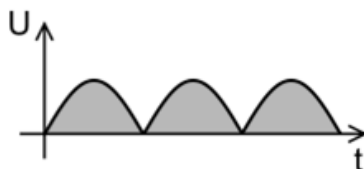
Napon između katode i anode kod tipičnih primjena, a pogotovo terenskih primjena, ne prelazi 450 kV. Do 300 kV moguće je sustav za rendgensko ispitivanje izvesti kao jedan relativno kompaktan uređaj, dok je za 450 kV jedinice potrebno napajanje izvesti van kućišta zbog izuzetnih zahtjeva na električnu izolaciju.

Za dobivanje tako visokog napona koristi se sustav sačinjen od transformatora koji ulazni napon električne mreže pretvara u visoki napon; te od istosmjernog ispravljača.

Upotreba transformatora sa sobom povlači i upotrebu izmjenične struje kojoj struja i napon mijenjaju smjer (Slika 3.7)



Slika 3.7 – Valni oblik napona na transformatoru [5]



Slika 3.8 – Ispravljeni (istosmjerni) napon [5]

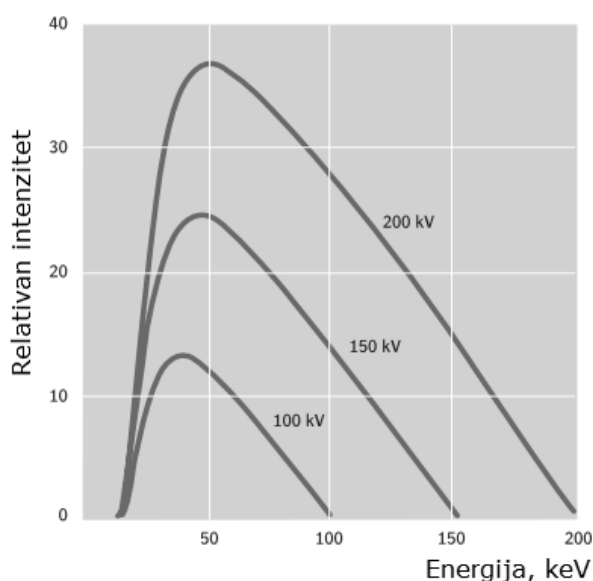
U rendgenskoj cijevi putanja elektrona je jednosmjerna, odnosno radi se o istosmjernoj struji i naponu i obavezno je na neki način ispraviti izmjenični napon transformatora u istosmjerni napon cijevi.

Neke rendgenske cijevi su konstruirane i osmišljene za mehaničko ispravljanje izmjeničnog napona transformatora, ali većina cijevi koristi ispravljače (s diodama ili tiristorima). U oba slučaja električni napon između anode i katode na kraju izgleda kao na prethodnoj slici (Slika 3.8), s naglaskom da je prikazane „rupe“ između poluvalova potrebno dodatno zagladiti. To se obično radilo jednostavnim ubacivanjem kondenzatora u izlazni krug ispravljača, a u novijim generacijama uređaja to se radi frekvencijskim pretvaračima koji frekvenciju napona dignu preko 50 kHz čime prikazane „rupe“ nestanu.

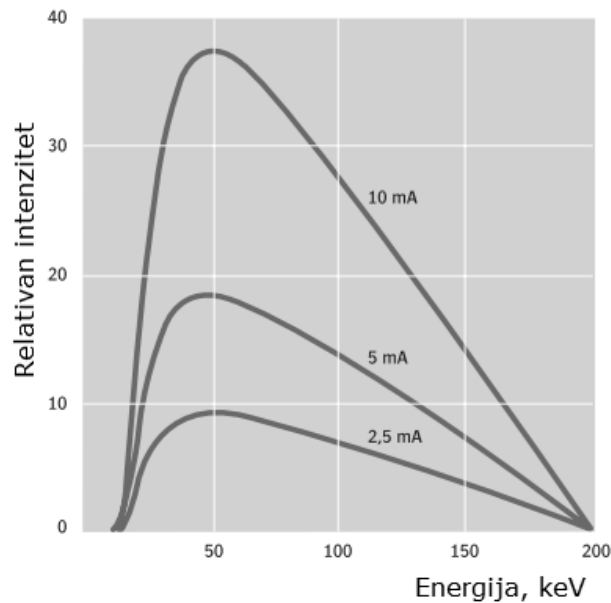
3.1.5. Utjecaj električnog napona i struje cijevi na emitirano zračenje

Rendgenske cijevi nije moguće standardizirati i kalibrirati, pa čak do te mjere da se izravnom usporedbom dvaju cijevi istih parametara neće dobiti isti spektar zračenja. Svaka rendgenska cijev dolazi sa svojim specifikacijama, ali moguće je razmotriti kako se općenito zračenje ponaša s obzirom na variranje električnog napona i električne struje cijevi. [3]

Intenzitet zračenja je proporcionalan električnoj struji u cijevi, ali ne utječe na spektar (tvrdoću) zračenja. S druge strane, električni napon ima izuzetno jak utjecaj na spektar zračenja, kako je moguće i vidjeti na sljedećim slikama.



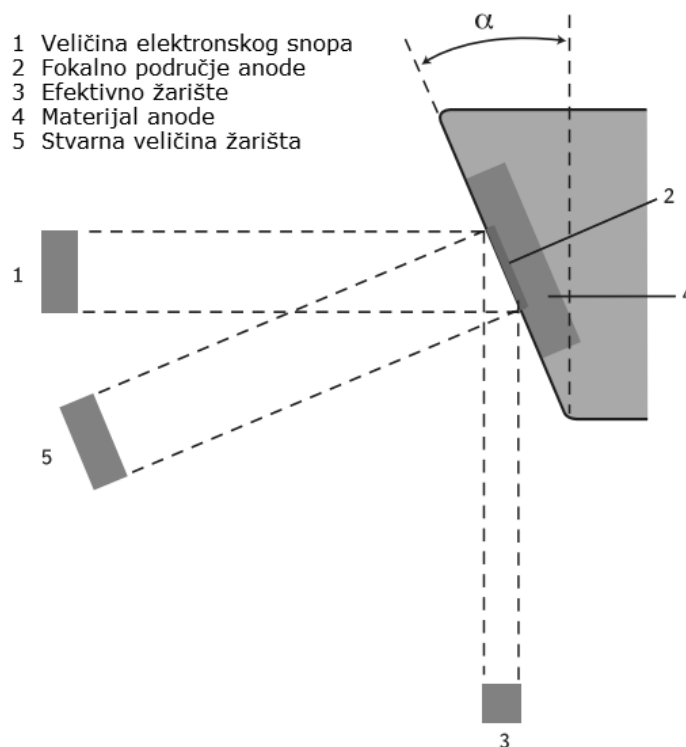
Slika 3.9 – Utjecaj napona na spektar energija zračenja [3]



Slika 3.10 - Utjecaj struje cijevi na spektar energija zračenja [3]

3.1.6. Efektivna veličina žarišta

Projekcija rendgenskih zraka na površinu koja im je okomita naziva se efektivnom veličinom žarišta. U radiografskom ispitivanju nastoji se dobiti što je manje moguću veličinu žarišta jer ona ovisi o oštrocini dobivene slike. Što je manja veličina žarišta, to je dobivena slika oštrocija. Rendgenske cijevi imaju veličinu žarišta od 4x4 mm pa sve do vrijednosti manjih od 50 μm . Veličina žarišta ovisi o fokalnom području anode i kutu α (Slika 3.11).



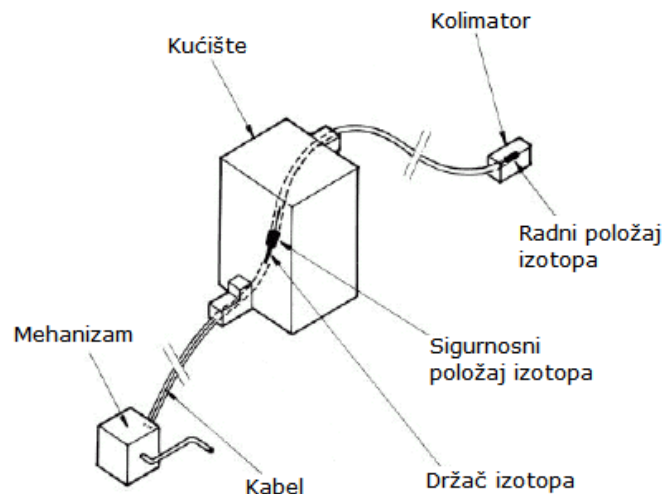
Slika 3.11 – Efektivna veličina žarišta rendgenskog zračenja [3]

3.2. Izvori gama zračenja

Za razliku od izvora rendgenskog zračenja, izvori gama zračenja, su konstrukcijski mnogo jednostavniji. Općenito, uređaj za emitiranje gama zračenja sastoji se od kućišta, mehanizma za pozicioniranje kapsule, i samog radioaktivnog izotopa.

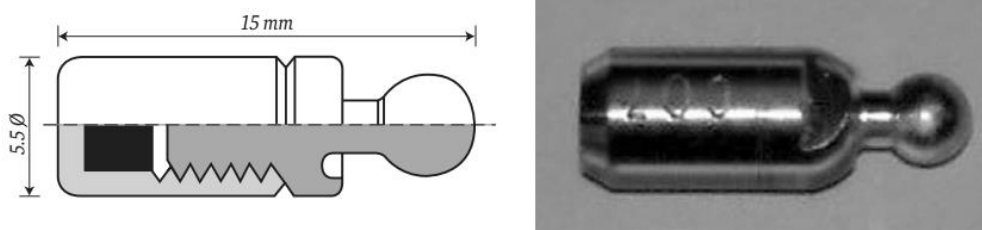
Glavna svrha kućišta je da okolinu zaštititi od neželjenog zračenja. Kao izolacija, koristi se osiromašeni uran koji se pokazao izuzetno dobrim izolatorom, čak boljim i od olova. Masa izolacije od urana je tipično od 22 kg za izotop iridija-192 do čak 225 kg za slučaj izotopa kobalta-60. [3]

Mehanizam za pozicioniranje kapsule sačinjavaju fleksibilan kabel s kapsulom izotopa, ručica za namatanje kabela i cijev koja služi kao vodilica. Na početku ispitivanja operater pomoću ručice odmotava kabel s kapsulom izotopa, koja potom sjeda na mjesto ekspozicije. Snop gama zraka se ograničava i usmjerava prema površini koja je od interesa pomoću kolimatora, bez kojega bi izuzetna količina zračenja bila emitirana u svim smjerovima. Nakon određenog vremena ekspozicije operater jednostavno ručkom namotava kabel natrag u kućište, čime je izotop vraćen u sigurnosni položaj. Kabel je što je moguće dulji, kako bi se iz sigurnosnih razloga dobila što veća udaljenost između osobe koja vrši ispitivanje i samog radioaktivnog izvora.



Slika 3.12 – Sustav za radiografsko ispitivanje gama zračenjem [6]

Dimenzije izotopa se razlikuju ovisno o proizvođaču, ali obično se radi o kuglicama promjera 1,5 mm. One se zavarivanjem zatvaraju u kapsulu od nehrđajućeg čelika koja je spojena na kraj fleksibilnog kabela.



Slika 3.13 – Kapsula s radioaktivnim izotopom [3]

Radiografija izotopima je potencijalno vrlo opasna jer se izotop, za razliku od rendgenske cijevi, ne može isključiti. Međutim, nalazi svoju primjenu prvenstveno zbog toga što ne zahtjeva izvor električne energije, što je prvenstveno praktično na terenskim ispitivanjima.

4. Filteri i folije

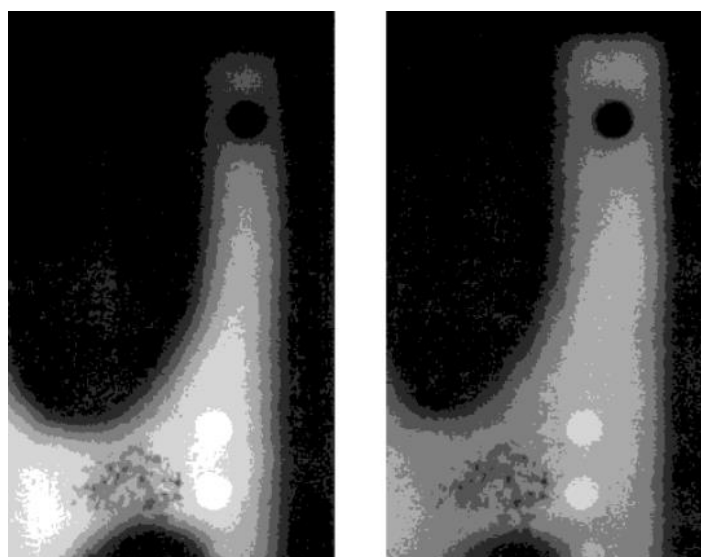
Filteri i folije su dijelovi sustava za radiografsko ispitivanje kojima se nastoji utjecati na zračenje. Uobičajeno se koriste za filtriranje zračenja niske energije, odnosno za dobivanje intenzivnijeg zračenja kako bi se povećao ili smanjio kontrast snimke.

4.1. Radiografski filteri

Filteri se pozicioniraju između predmeta ispitivanja i izvora zračenja kako bi iz spektra uklonili niskoenergetsko zračenje (čime se gubi na kontrastu snimke), te između predmeta ispitivanja i filma kako bi se smanjio utjecaj raspršenog zračenja (čime se dobiva bolji kontrast snimke). Dobar odabir i balans tih dvaju filtera stoga može biti veliki faktor u kvaliteti radiografske snimke.

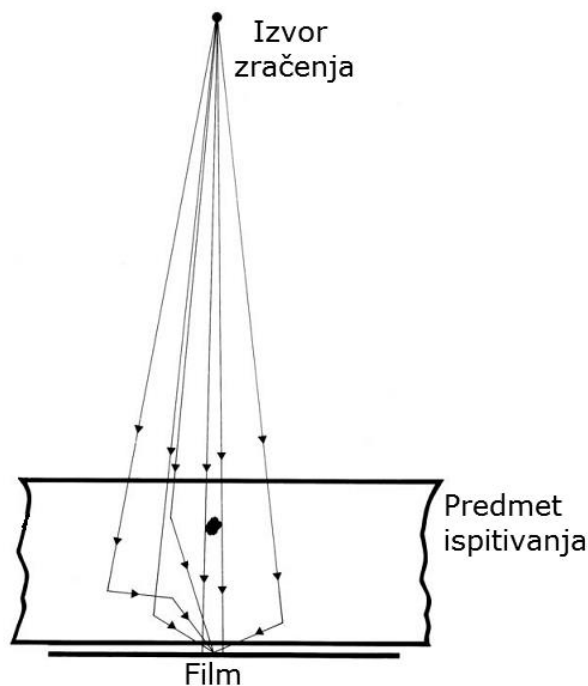
Upotreba filtera je neophodna za uklanjanje raspršenog (sekundarnog) zračenja relativno niske energije. Takvo je zračenje, iako niske energije, dovoljno da utječe na film i stvara sjene i zamućenje filma čime se smanjuje kontrast. Izvori raspršenog zračenja su okolina i raspršeno zračenje u samome predmetu ispitivanja. Pri ispitivanju predmeta velikih debljina, raspršeno zračenje može na filmu poprimiti i do 10 puta veći intenzitet od primarnog zračenja.

Najčešći materijali za izradu filtera su olovo, bakar i mjed. Debljine su od 0,1 mm do 0,25 mm za 300 kV, odnosno 0,25 mm do 1 mm za 400 kV rendgenske izvore. [3]



Slika 4.1 – Uzorak snimljen bez filtera (lijevo) i s filterom (desno) [7]

Stavljanjem filtera između izvora i predmeta je u slučajevima predmeta varijabilne debljine povoljno jer bi preveliki kontrast eliminirao rubne dijelove predmeta (Slika 4.1).



Slika 4.2 – Raspršeno zračenje u predmetu ispitivanja [3]

4.2. Radiografske folije

S obzirom da se filteri koriste kako bi zaustavili određene energije zračenja, folije se koriste kako bi preostali spektar bio bolje iskorišten. Radiografska snimka se dobiva od približno 1% ukupnog zračenja koje dopiye do filma, te je iz tog razloga film i s prednje i sa stražnje strane prekriven folijom. Konačno, efekti folije su da smanjuje potrebno vrijeme ekspozicije i da poboljšava kontrast i količinu detalja na snimci.

Folije se dijele prema materijalu od kojeg su načinjene. Najčešće vrste folija su olovne, ali postoje i čelične, bakrene i fluorescentne.

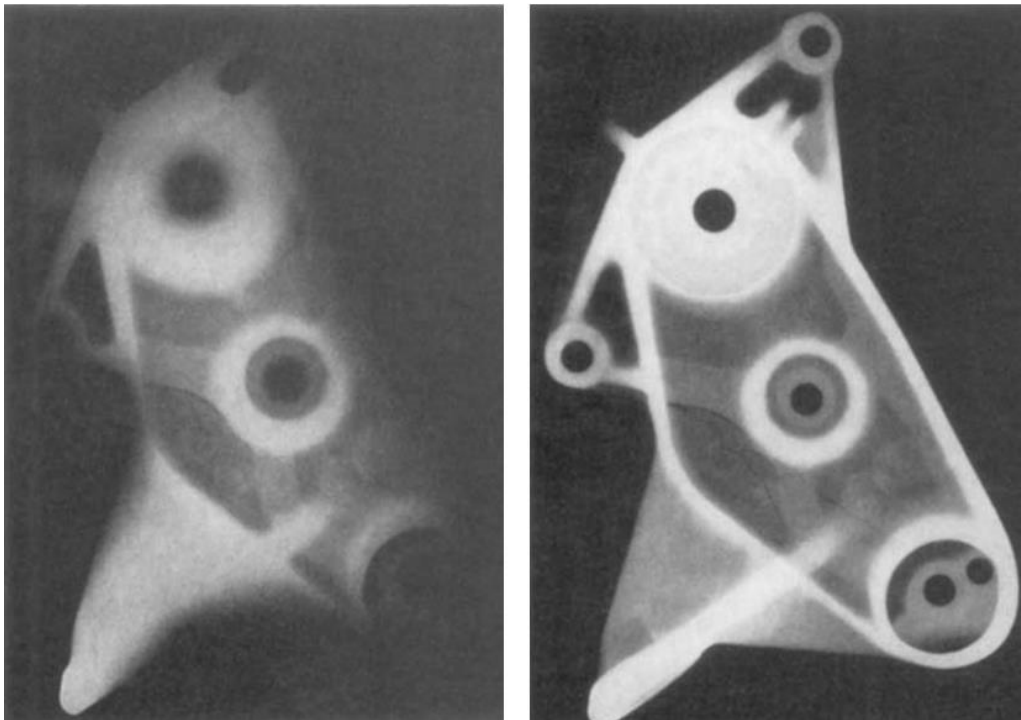
4.2.1. Olovne folije

Kada se olovna folija izlaže rendgenskom ili gama zračenju, ona emitira elektrone. Taj efekt se koristi u radiografiji, jer je film kao medij na kojem nastaje snimka, osjetljiv na te elektrone. Praktično se film smješta između dva sloja olovne folije čime se može dobiti ukupno pojačanje intenziteta zračenja i do 4 puta. Pojačanje za rezultat ima kraće potrebno vrijeme ekspozicije čime se ubrzava čitav proces snimanja. Ovakav postav se koristi i kod rendgenskog i kod gama zračenja energija od 80 keV do 420 keV [3].

Olovne folije se prema smještaju u odnosu na film dijele na prednje i stražnje. Debljina prednje folije se izabire na način da se kroz nju propusti što više primarnog zračenja, a zaustavi što više sekundarnog zračenja nižih energija i većih valnih duljina. Stoga se može reći da prednja folija primarno filtrira zračenje, a tek sekundarno pridonosi njegovom intenziviranju. Ovisno o energiji izvora zračenja, olovne folije mogu svojim filtriranjem i negativno utjecati na intenzitet konačnog zračenja koje dopire na film, ali je efekt filtracije čak i u tom slučaju presudan u dobivanju čistije snimke (Slika 4.3)

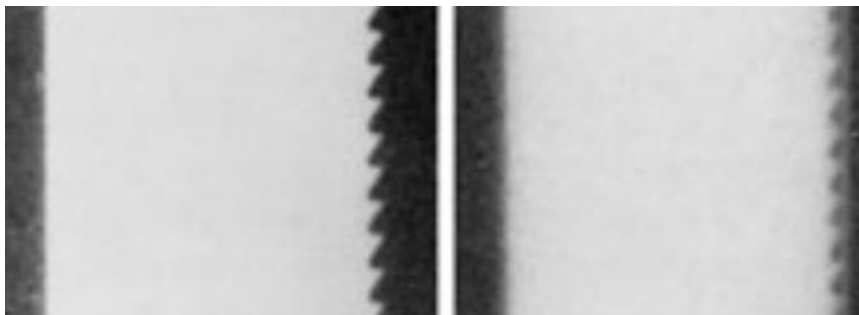
U slučaju računalne radiografije, upotreba olovnih folija nije jednoznačno dobra jer rezultati ovise o uvjetima ispitivanja i konkretnom predmetu koji se ispituje. Baš zbog potpune linearnosti odziva slikovnih ploča, moguće je da upotreba olovnih folija dovede do pretjeranog skraćivanja vremena ekspozicije predmeta, čime se dovodi u opasnost kvaliteta radiograma. U tim slučajevima moguće je da odnos signal-šum bude smanjen, i konačno da je na radiogramu više šuma i manje detalja nego što bi se to htjelo.

Debljina prednje olovne folije je obično između 0,02 i 0,15 mm. Stražnja folija je veće debljine (oko 0,25 mm) jer joj je glavna uloga eliminirati raspršeno zračenje koje je proizašlo iz predmeta snimanja. Kvaliteta površine folije je izuzetno bitna, jer će se bilo kakva površinska oštećenja na foliji pokazati i na konačnoj snimci. To je razlog zašto se površina folije polira prije upotrebe, ili još bolje – vakuumski pakira u kasetu zajedno s filmom čime se dobiva najviša kvaliteta snimke.



Slika 4.3 – Snimka bez olovnih folija (lijevo) i s njima (desno) [3]

Uz kvalitetu površine folije, bitno je i njeno prijanjanje uz film. Ako ono nije adekvatno, bez obzira na sve prethodno navedene prednosti koje folije daju, dobit će se vidno замуćenija snimka (Slika 4.4)



Slika 4.4 – Snimka uz dobro prijanjanje folije na film (lijevo) i loše (desno) [7]

4.2.2. Čelične i bakrene folije

Olovne folije, iako najčešće upotrebljavane, nisu pogodne za zračenja izuzetno visokih energija (5-8 MeV), te se tada koriste čelične ili bakrene folije. Bakrene folije, iako skuplje, pri višim energijama zračenja daju bolje rezultate od olovnih folija bilo koje debljine.

4.2.3. Fluorescentne folije

Ove folije koriste istoimeni efekt fluorescencije pri kojem materija emitira svjetlost pod utjecajem elektromagnetskog zračenja. Neki materijali emitiraju toliko svjetlosti da imaju više fotografskog efekta na snimku od samog ionizirajućeg zračenja.

Jedna od vrsta fluorescentnih folija su i folije sa solima. One uz fluorescentni sloj imaju i sloj mikro kristala najčešće od rudače volframa (CaWO_4) koja također ima fluorescentna svojstva. Ove folije izuzetno povećavaju intenzitet zračenja, čak i do 50 puta, čime se značajno smanjuje vrijeme ekspozicije zračenju. To ima negativan efekt na oštrinu dobivene snimke, pa se ove, a i fluorescentne folije općenito rijetko koriste u industrijskoj radiografiji, osim za detekciju većih nepravilnosti; i za situacije kad je neophodno dobiti snimku što je prije moguće.

4.2.4. Fluorometalne folije

Kako se može zaključiti iz imena, ove folije nastoje kombinirati prednosti fluorescentnih i metalnih folija. Konstrukcijski se sastoje od olovne folije i fluorescentnog sloja. Njihov stupanj intenziviranja zračenja ovisi o upotrijebljenom filmu pa se s njima koriste filmovi za brze cikluse snimanja (F6 u tablici). Njihovom upotrebom s vrijeme ekspozicije može skratiti za 5 do 10 puta u odnosu na olovne folije i klasičan film (D7 u tablici). Međutim, skraćanjem vremena ekspozicije se narušava kvaliteta (kontrast i detalji) snimke.

Tablica 4.1 – Skraćenje vremena ekspozicije

Film i folija	Relativno vrijeme ekspozicije	
	200 kV	Iridij-192 (450 kV)
F6 i fluorometalna folija	0,1	0,2
D7 i olovna folija	1,0	1,0

5. Digitalna radiografija

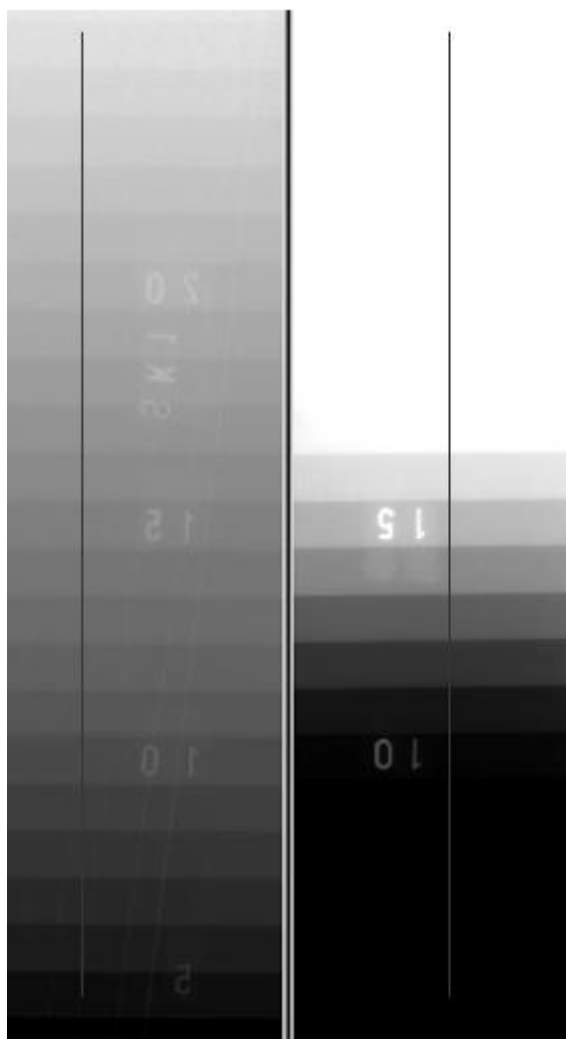
Radiografija je kao i mnoge druge metode nerazornih ispitivanja doživjela značajne promjene pojavom računala, i razvila se u digitalnu radiografiju koja se izvodi kao:

- 1) Digitalizacija konvencionalnog filma u svrhu pohrane i/ili manipulacije
- 2) Radiografija koja umjesto fleksibilnog filma koristi polu fleksibilne slikovne ploče s fosfornom prevlakom (računalna radiografija)
- 3) Radiografija bez prisustva fizičkog medija, te se direktno i u realnom vremenu digitalizira pomoću elektroničkog detektora (direktna radiografija)

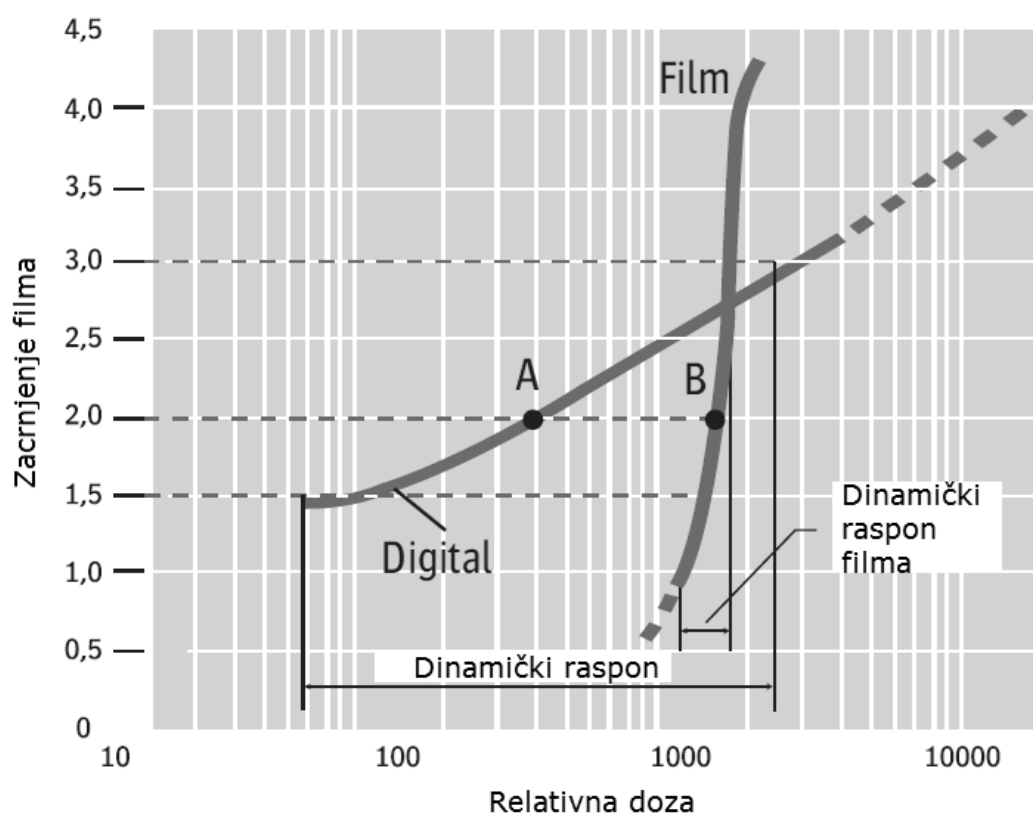
U ovome radu se obrađuje upotreba slikovnih ploča, odnosno računalne radiografije, čije su glavne prednosti ponovna iskoristivost, kraće vrijeme ekspozicije, brže procesiranje i manje zagađenje okoliša zbog nepostojanja potrebe za upotrebom štetnih kemikalija. Međutim, valja napomenuti i klasične prednosti digitalnih tehnika, a to su lakše spremanje i čuvanje snimaka bez degradacije kvalitete, mogućnost anotacije i dijeljenje snimaka elektroničkim putevima, a možda najbitnija od svih prednosti je mogućnost digitalne manipulacije slikom.

5.1. Računalna radiografija

Iako ne daje rezultate jednake rezolucije kao film najfinije granulacije, računalna radiografija je alternativa za film srednje do grube finoće. Za razliku od konvencionalnog filma, ova metoda zahtijeva mnogo manje doze zračenja što je odlično sa aspekta sigurnosti i vremena ekspozicije. Još jedna od prednosti je i puno veći dinamički raspon, što znači da je slikovnom pločom moguće prikazati puno veći broj nijansi crne boje, tj. zacrnljenja u odnosu na film. Razlog velikom dinamičkom rasponu je linearna ovisnost reakcije fosfornih kristala na zračenje, za razliku od eksponencijalne reakcije kristala srebra u filmovima.



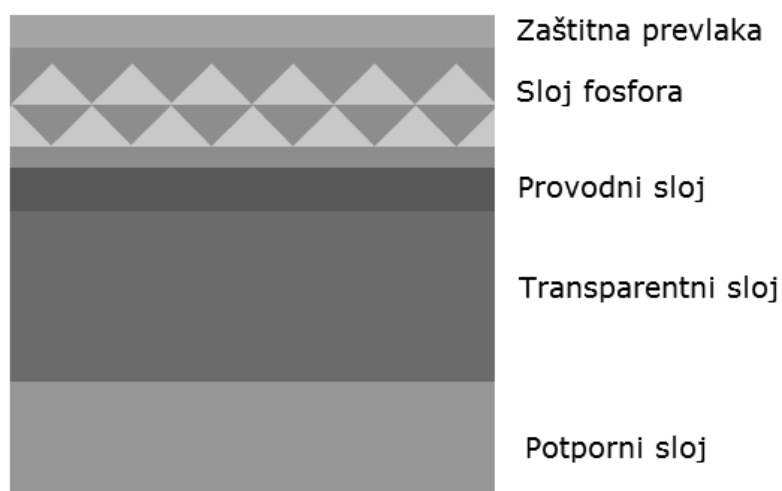
Slika 5.1 – Slikovna ploča (lijevo) i film (desno) pri stepeničastom uzorku [8]



Slika 5.2 – Reakcije filma i slikovne ploče na zračenje [3]

5.1.1. Slikovna ploča

Glavna komponenta računalne radiografije je slikovna ploča koja je zamijenila film. Slikovne ploče se koriste zasebno, ili su ukomponirane u višeslojnu kasetu koja sadrži i prednju i stražnju foliju. U ovome radu se pretpostavlja upotreba zasebne slikovne ploče.



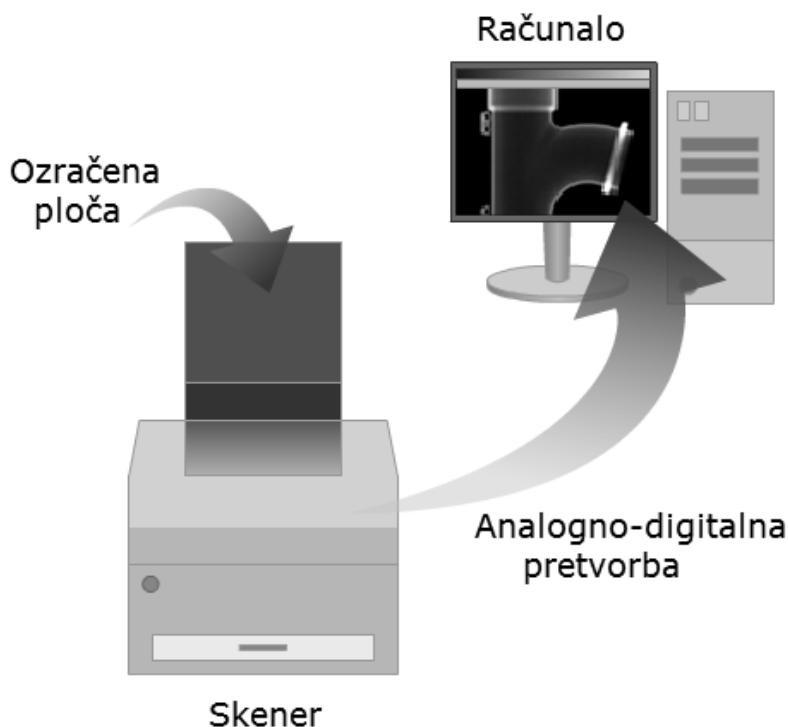
Slika 5.3 – Slojevi slikovne ploče [3]

Struktura slikovne ploče je prikazana slikom na prethodnoj stranici. Prema slici je vidljiv fosforni sloj koji je nanesen na provodni i transparentni sloj, a mehaničku čvrstoću i svojstva osigurava potporni sloj. Fosforni sloj je sa svoje gornje strane zaštićen zaštitnom prevlakom. Uz pravilnu upotrebu, slikovne ploče se mogu ponovno upotrebljavati i više od tisuću puta.

5.1.2. Dobivanje snimke

Radiografska snimka ovim postupkom se ne dobiva izravno, već se sprema u fosforni sloj. Zračenje koje tijekom ekspozicije dođe do slikovne ploče, biva „zarobljeno“ u fosfornom sloju, što znači da su elektroni ostali u polu-stabilnom stanju. Ozračena ploča se tada stavlja u skener koji laserom oslobađa zarobljene elektrone koji emitiraju svjetlost zbog fenomena fotoluminiscencije. Fotoluminiscencija je fenomen pri kojem materija emitira svjetlost pri svjetlosnoj (foto) uzbudi, u ovom slučaju – laserom.

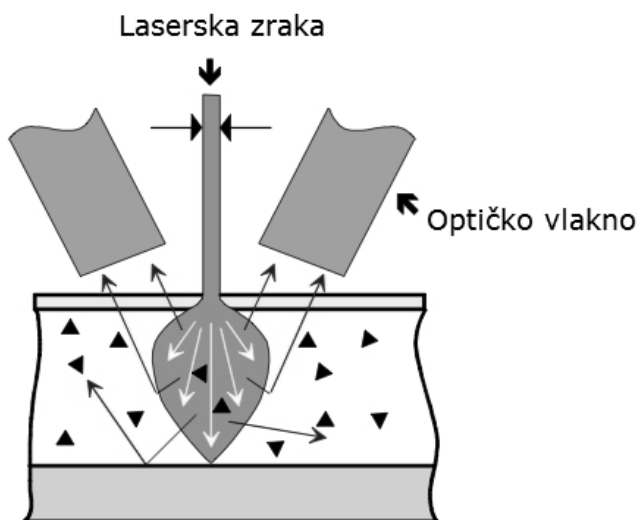
Skeniranje laserom vrši se linearno, s tipičnim brzinama od 5 do 10 mm/s [3]. Emitirana svjetlost se pretvara u električni napon putem fotomultiplikatora, tj. elektronske cijevi osjetljive na vidljivu i nevidljivu svjetlost. Naposljetku se rezultirajuća slika analogno-digitalnim pretvornikom pretvara u digitalni oblik i može se jednostavno pregledavati na zaslonu računalnog monitora u odgovarajućem softveru.



Slika 5.4 – Put od slikovne ploče do prikaza na računalu [9]

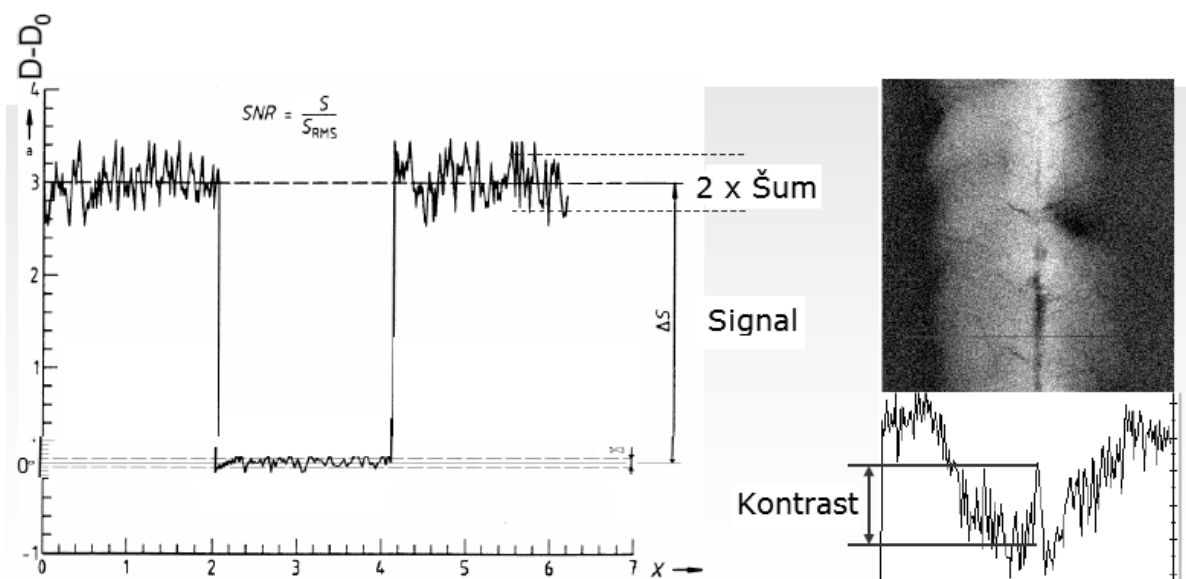
5.1.3. Nedostaci slikovnih ploča

Najveći problem pri upotrebi slikovnih ploča je njihova osjetljivost na raspršeno zračenje, tj. zračenje nižih energija. Puno su osjetljivije nego što je to konvencionalni film, pa se teži što kraćem vremenu ekspozicije. Međutim, kraćim vremenom ekspozicije se gubi na odnosu signal-šum, pa nisu vidljivi neki finiji detalji. Iz toga razloga se uglavnom za uzorke veće debljine koristi zračenje veće energije.



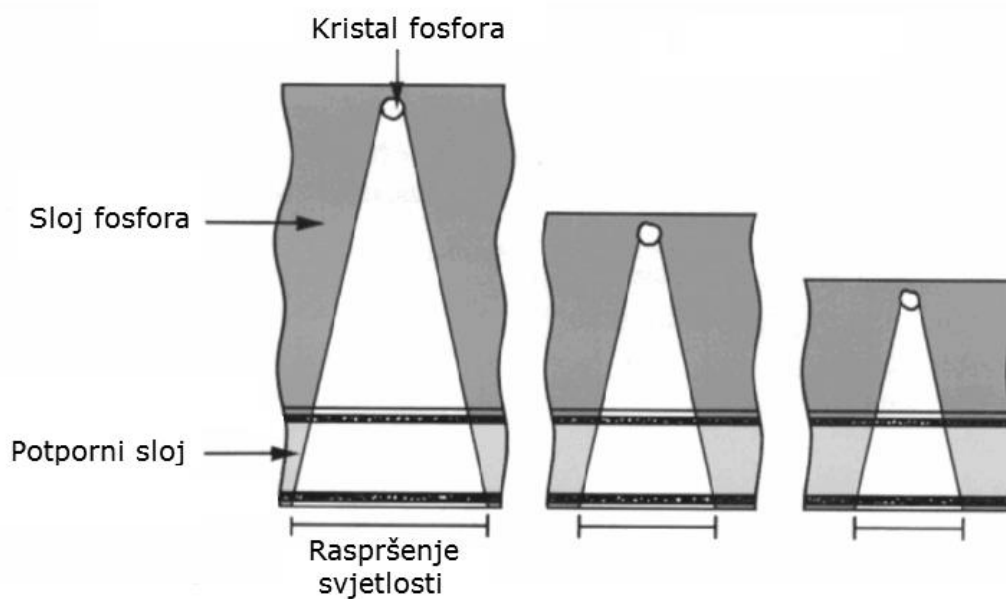
Slika 5.5 – Raspršenje incidentne skenirajuće laserske zrake u fosfornom sloju [10]

Slikovne ploče imaju nedostataka i zbog svoje konstrukcije. Zaštitni sloj koji se nalazi povrhu fosfornog sloja, iako tipične debljine oko 10 mikrometara, ima negativan utjecaj jer stvara distorziju (šum) na snimci, te smanjuje odnos signal-šum.



Slika 5.6 – Odnos signal-šum (SNR) i kontrast-šum [8]

Debljina glavnog fosfornog sloja utječe na prostornu razlučivost i oštrinu radiograma. Prostorna razlučivost je najmanja veličina dvaju objekata (npr. linije) na slici pri kojoj možemo razlučiti jedan objekt od drugoga. [8] Teži se većoj razlučivosti kojoj odgovara manja debljina fosfornog sloja. Isto tako, i oštrina radiograma je veća pri fosfornom sloju manje debljine. Slikom je prikazano da kristal fosfora u sloju veće debljine, pri skeniranju emitira svjetlost koja postiže veće raspršenje (manju oštrinu).



Slika 5.7 – Smanjenje oštine s obzirom na debljinu fosfornog sloja [10]

Za razliku od navedenih negativnih efekata debljine fosfornog sloja, osjetljivost fosforne ploče postaje veća s povećanjem debljine fosfornog sloja. Osjetljivost se povećava samo do određene debljine, pa se ne može reći da je taj efekt, iako pozitivan, od primarnog značaja.

5.1.4. Norme za računalnu radiografiju

Od 2005. godine, NDT sustavi za računalnu radiografiju podliježu normama DIN EN 14784-1 i DIN EN 14784-2 koje se primarno koriste u Europi, ali i u svijetu. Glavna namjena im je pružiti dobru mjernu ponovljivost i obnovljivost prilikom ispitivanja metodom računalne radiografije.

DIN EN 14784-1 se odnosi na klasifikaciju sustava za računalnu radiografiju, DIN EN 14784-2 se odnosi na preporuke općih principa postupanja prilikom izvođenja računalne radiografije. Bazira se na već prihvaćenim normama za radiografiju pomoću klasičnih filmova (EN 444 i ISO 5579), pa sukladno tome slijedi i preporuke za postavke geometrije izvora i detektora zračenja. Glavne tablice iz norme su dane slikama koje slijede.

Table 2 — IP-system classes and metal screens for the computed radiography of steel, copper- and nickel based alloys

Radiation source	Penetrated wall thickness w in mm	IP system class ^a		Type and minimum thickness in mm of metal screen	
		A	B	Front	Back
X-ray < 50 kV		4	2	None	None
X-ray 50 kV to 150 kV		5	3	Pb 0,1	Pb 0,1
X-ray > 150 kV to 250 kV		5	4	Pb 0,1	Pb 0,1
X-ray > 250 kV to 350 kV	$w < 50$	5	4	Pb 0,2	Pb 0,2
	$w > 50$	5	5	Pb 0,3	Pb 0,3
X-ray > 350 kV to 450 kV	$w < 50$	5	4	Pb 0,3	Pb 0,3
	$w > 50$	5	5	Pb 0,3	Pb 0,3
Yb 169, Tm 170	$w < 5$	5	3	Pb 0,1	Pb 0,1
	$w > 5$	5	4	Pb 0,1	Pb 0,1
Ir 192, Se 75	$w < 50$	5	4	Pb 0,3	Pb 0,3
	$w > 50$	5	5	Pb 0,4	Pb 0,4
Co 60 ^b	$w < 100$	5	4	Fe 0,5+Pb 1,5	Fe 0,5+Pb 1,0
	$w > 100$	5	5	Fe 0,5+Pb 2,0	Fe 0,5+Pb 1,0
X-ray > 1 MV ^b	$w < 100$	5	4	Fe 0,5+Pb 1,5	Fe 0,5+Pb 1,0
	$w > 100$	5	5	Fe 0,5+Pb 2,0	Fe 0,5+Pb 1,0

^a Better IP-system classes may also be used.

^b In case of multiple screens (Fe+Pb) the steel screen shall be located between the IP and the lead screen. Instead of Fe or Fe+Pb also copper, tantalum or tungsten screens may be used if the image quality can be proven.

Slika 5.8 – Klase slikovnih ploča i metalnih folija za računalnu radiografiju čelika te legura nikla i bakra

Table 4 — Required spatial system resolution in dependence on energy and wall thickness

Radiation source	Wall thickness w in mm	Class IPA		Class IPB	
		Max. pixel ^a size μm	Double wire IQI number ^b	Max. pixel ^a size μm	Double wire IQI number ^b
X-ray $U_p \leq 50 \text{ kV}$	$w < 4$	40	$> 13^c$	30	$>> 13^d$
	$4 \leq w$	60	13	40	$> 13^c$
X-ray $50 \text{ kV} < U_p \leq 150 \text{ kV}$	$w < 4$	60	13	30	$>> 13^d$
	$4 \leq w < 12$	70	12	40	$> 13^c$
	$w \geq 12$	85	11	60	13
X-ray $150 \text{ kV} < U_p \leq 250 \text{ kV}$	$w < 4$	60	13	30	$>> 13^d$
	$4 \leq w < 12$	70	12	40	$> 13^c$
	$w \geq 12$	85	11	60	13^c
X-ray $250 \text{ kV} < U_p \leq 350 \text{ kV}$	$12 \leq w < 50$	110	10	70	12
	$w \geq 50$	125	9	110	10
X-ray $350 \text{ kV} < U_p < 450 \text{ kV}$	$w < 50$	125	9	85	11
	$w \geq 50$	160	8	110	10
Yb 169, Tm 170		85	11	60	13
Se 75, Ir 192	$w < 40$	160	8	110	10
	$w \geq 40$	200	7	125	9
Co 60		250	6	200	7
X-ray $U_p > 1 \text{ MeV}$		250	6	200	7

^a If magnification technique is used, double wire IQI readout is required only.

^b The given IQI numbers indicate the readout value of the first unresolved wire pair corresponding to EN 462-5.

^c The symbol " $> 13^c$ " requires the 13th wire pair to be resolved with a dip separation larger than 20 % (see Figure 3 of EN 14784-1:2005).

^d The symbol " $>> 13^d$ " requires the 13th wire pair to be resolved with a dip separation larger than 50 %.

U_p = tube voltage.

Slika 5.9 – Zahtijevana prostorna rezolucija s obzirom na energiju zračenja i debljinu stjenke

6. Slikovne ploče Kodak Industrex [11]

Za potrebe ovog rada, koristiti će se slikovne ploče proizvođača Kodak, model Industrex. U ovom poglavlju će biti opisana svojstva i karakteristike tih slikovnih ploča.

Slikovne ploče Industrex se s obzirom na rezoluciju dijele na opće namjenske (eng. general purpose ili GP), visoke rezolucije (eng. high resolution ili HR) i tzv. “blue” ploče koje imaju najvišu rezoluciju. Tehničke karakteristike dane su tablicom. Kodak Industrex slikovne ploče ispunjavaju normu EN 14784-1.

Tablica 6.1 – Tehničke karakteristike slikovnih ploča

Vrsta ploče	Ukupna debljina, μm	Debljina sloja fosfora, μm	Debljina zaštitnog sloja, μm	Debljina potpornog sloja, μm
GP	436	160	4	18
HR	436	160	4	18
Blue	584	290	11	29

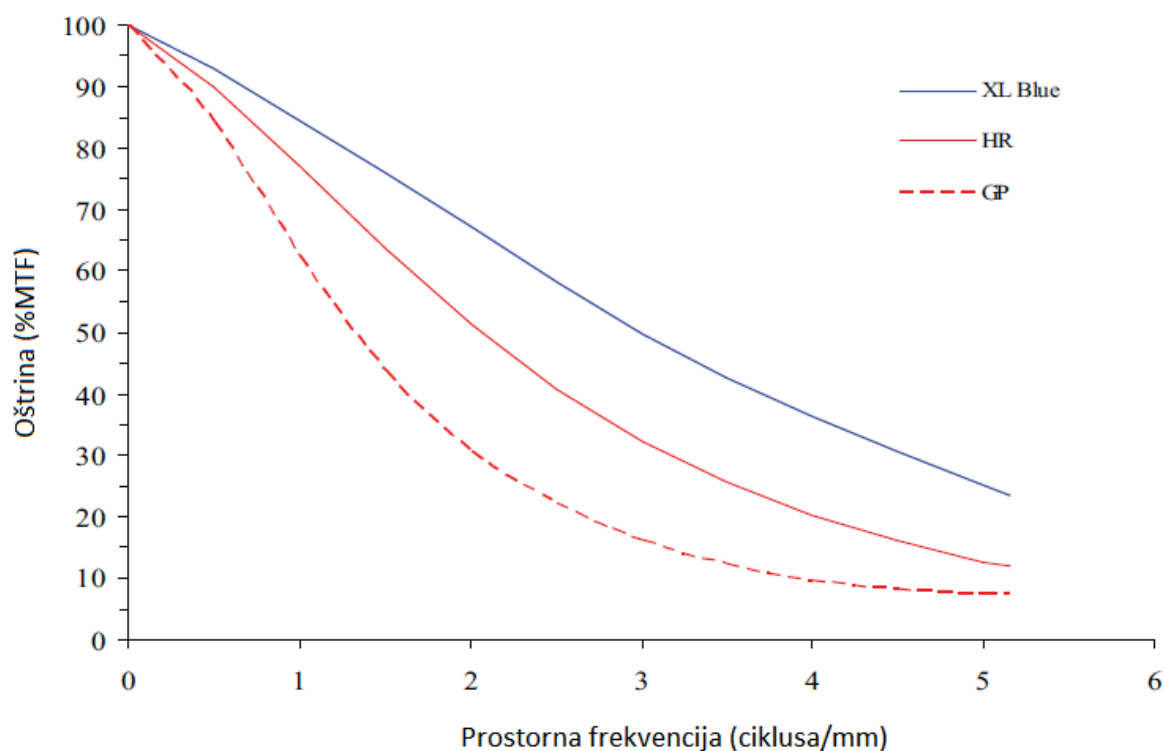
Fosforni sloj se sastoji od BaFBr (barijfluorbromjodida) koji je dopiran dvovalentnim europijem i nanesen na poliester debljine 10 μm . Zaštitni sloj se sastoji od polimera nedefiniranog sastava, a potporni sloj je načinjen od polikarbonata crne boje.

6.1. Oštrina

Oštrina ovih ploča se definira kroz modulacijsku prijenosnu funkciju (eng. modulation transfer function ili MTF), tj. mjeru moduliranja signala u odnosu na prostornu frekvenciju.

U kontekstu radiograma, modulacijska prijenosna funkcija iskazuje koliko se vjerno prenio kontrast snimanog predmeta na radiogram.

Prostorna frekvencija se definira kao broj ponavljanja signala po promatranom području (u ciklusima po milimetru). Prevedeno u kontekst radiograma, visoka prostorna frekvencija je slika s puno raznih detalja, dok nisku prostornu frekvenciju karakterizira mali broj detalja.

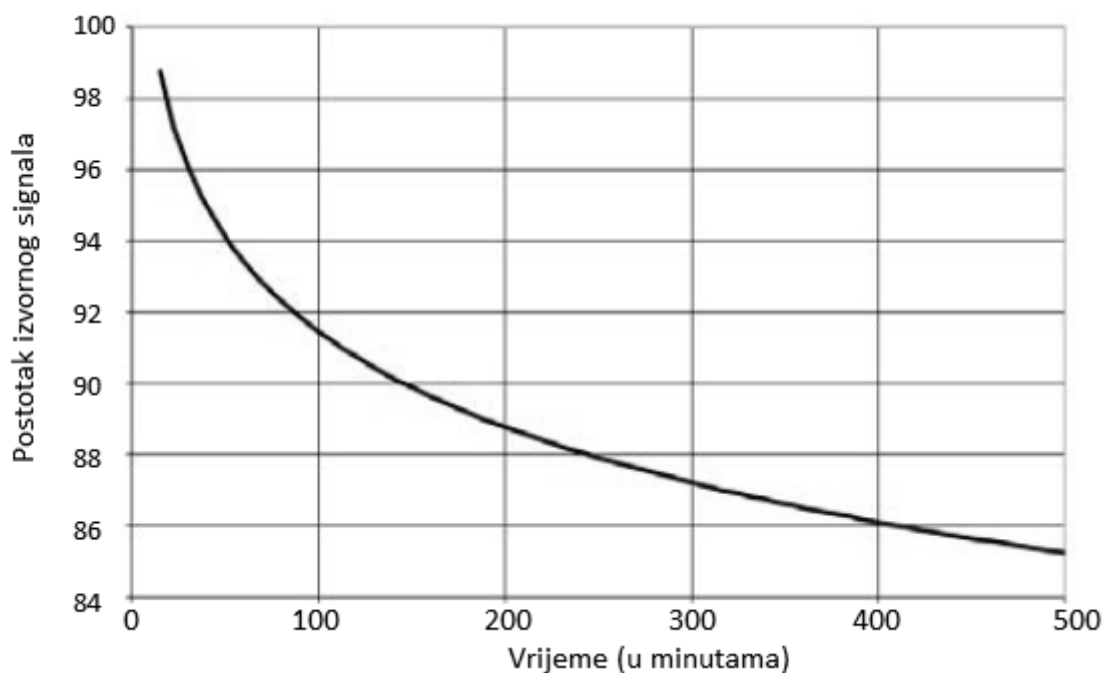


Slika 6.1 – Razlika u oštadini slikovnih ploča

Prema slici je vidljivo da su „Blue“ slikovne ploče u stanju dati radiogram najveće oštirine.

6.2. Zadržavanje snimke

Slikovne ploče se nakon ozračivanja digitaliziraju laserskim skenerom. U vremenu koje protekne između ozračivanja i skeniranja, dolazi do gubitka signala. Zadržavanje snimke je stoga sposobnost slikovne ploče da u nekom vremenu zadrži određeni postotak izvornog signala. Praktično se ovaj efekt odražava u tome da slikovna ploča s vremenom blijedi, što je naravno nepoželjno sa stajališta kvalitete snimke.



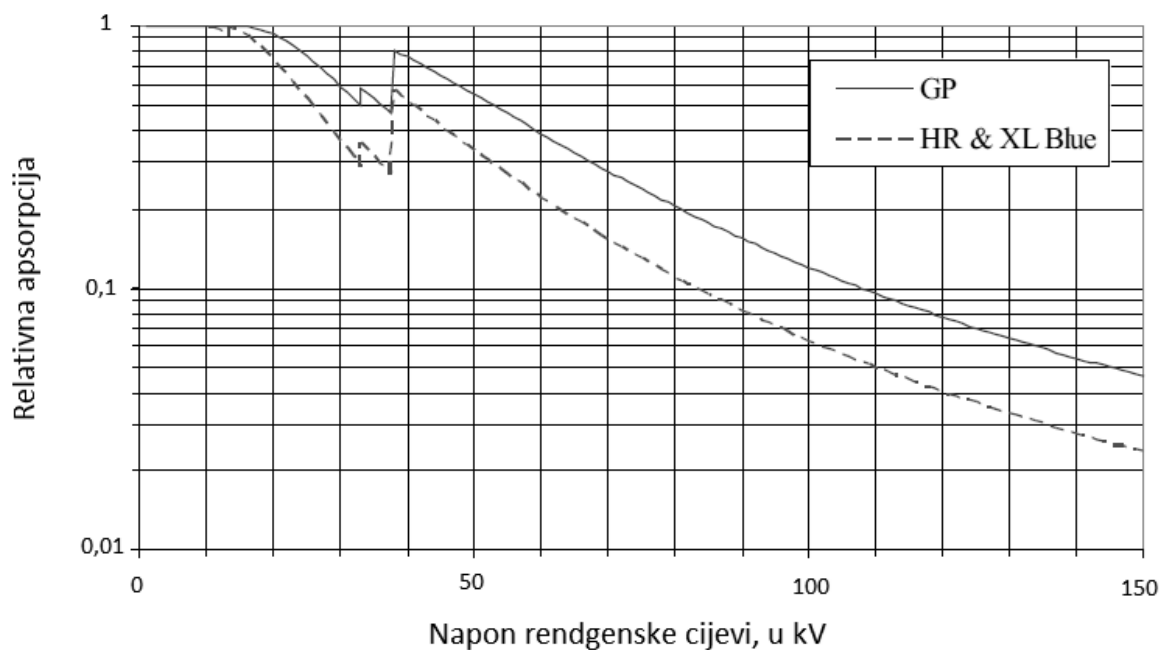
Slika 6.2 – Zadržavanje izvornog (snimljenog) signala

Slika prikazuje koliki postotak snimljenog signala zadržavaju slikovne ploče nakon ozračivanja rendgenom napona 120 kV u skladu s normom ASTM E2445. Proizvođač specificira zadržavanje barem 75% izvornog snimka nakon proteklog vremena od 4 dana.

6.3. Apsorpcija zračenja

Kao što je već spomenuto, slikovne ploče su osjetljive na raspršeno zračenje, tj. zračenje malih energija. Ta pojava je nepoželjna, i ilustrirana je slikom.

Prema proizvođačevoj preporuci se za izbjegavanje raspršenog zračenja koriste olovne folije tipično dva do tri puta veće debljine nego kod usporedivih radiografskih filmova.

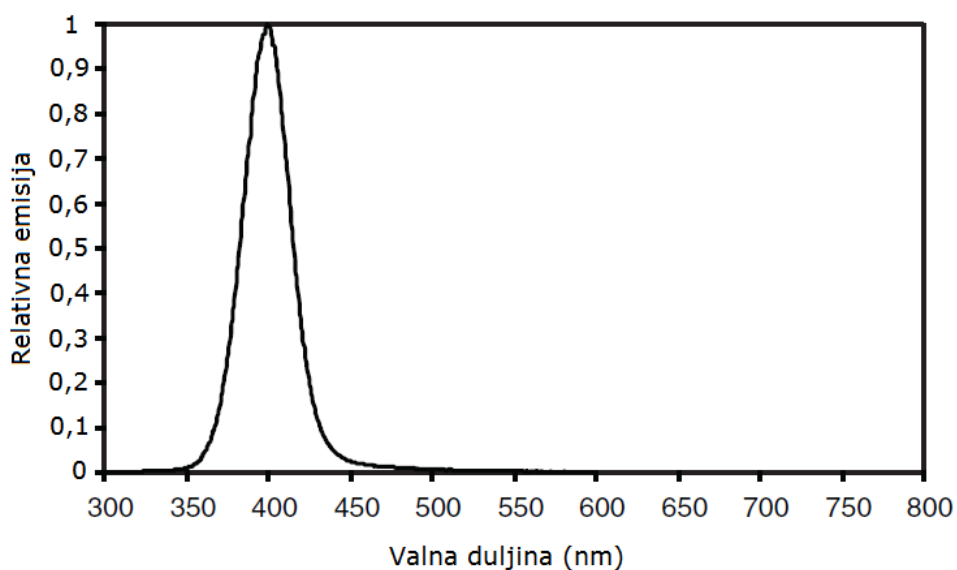


Slika 6.3 – Apsorpcija zračenja za Industrex slikovne ploče u ovisnosti o naponu rendgena

Još jedna od prednosti HR i „Blue“ ploča je da su manje osjetljive na zračenje nižih energija od GP ploča, iako razlika nije velika.

6.4. Emisija svjetlosti

Slikovne ploče se skeniraju laserskim diodama koje emitiraju svjetlost valne duljine od 550 do 560 nm. Prema slici se može vidjeti da foto stimulirana emisija ovih ploča rezultira svjetlošću valne duljine od 350 do 450 nm, tj. plavim svjetlom.



Slika 6.4 – Emisija svjetlosti Industrex slikovnih ploča (HR i GP)

7. Praktični dio

Cilj praktičnog djela rada bio je istražiti ovisnost olovnih folija i energije zračenja na kvalitetu radiografskog zapisa korištenjem tehnike računalne radiografije (cRT). Eksperiment je izveden u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

7.1. Eksperimentalni postav

Kao izvor zračenja korištena je rendgenska cijev pri različitim naponima kako bi se istražila ovisnost energije zračenja na kvalitetu radiograma. Također, varirana je debljina i smještaj olovnih folija kako bi se istražio utjecaj i tih varijabli na ishod pokusa.



Slika 7.1 – Rendgenska cijev na nosaču postavljena na 1 m visine

Rendgenska cijev bila je postavljena na visinu od 1000 mm, tj. ta udaljenost je bila udaljenost izvora zračenja od ispitivanog uzorka. Korišteni su naponi od 100, 175 i 250 kV pri konstantnoj struji od 4 mA.

Upravljanje rendgenskom cijevi je zbog sigurnosnih razloga izvedeno izvan prostorije u kojoj se obavlja snimanje. Proizvođač spomenute je belgijska tvrtka Balleau, koja je jedna od vodećih proizvođača rendgenskih cijevi za primjenu u području nerazornih ispitivanja. Upravljačka jedinica je prikazana slikom:



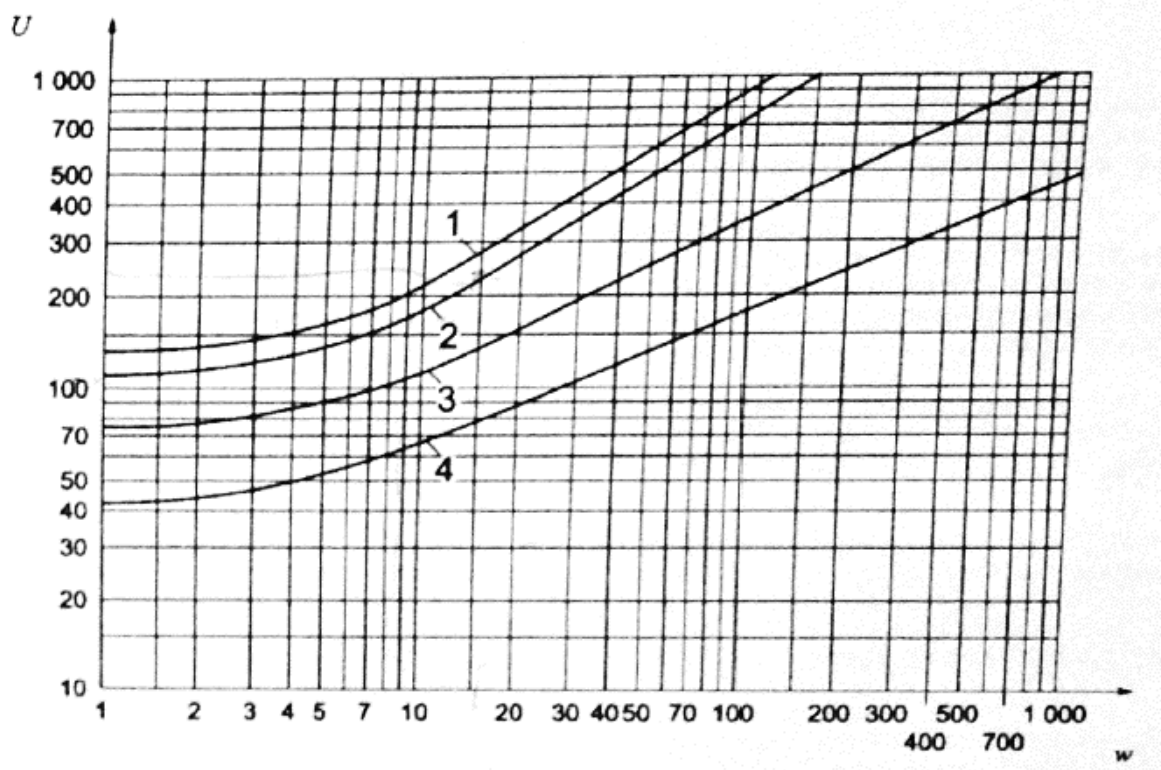
Slika 7.2 – Upravljačka jedinica rendgenske cijevi



Slika 7.3 – Detalj upravljačke jedinice s regulatorima za vrijeme, napon i struju

Kao ispitni uzorak korišten je čelični stepeničasti uzorak različitih debljina koje su bile varirane prema energiji zračenja. Odabir je izvršen prema preliminarnoj normi FprEN 16407-2:2013.

Korišten grafikon prikazan je slikom:



Slika 7.4 – Odabir debljine uzorka prema naponu rendgenske cijevi (prema normi)

Gdje je:

U – Napon rendgenske cijevi (u kV)

w – Penetrirana debljina materijala (u mm)

1 – Bakar, nikal i njihove legure

2 – Čelik

3 – Titan i njegove legure

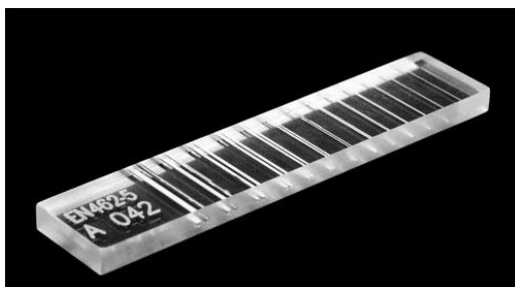
4 – Aluminiij i njegove legure

Prema grafikonu i raspoloživim uzorcima, odabrane su debljine od:

- 2 mm za napon 100 kV
- 10 mm za napon 175 kV
- 20 mm za napon 250 kV

Upotrijebljena je slikovna ploča Kodak Industrex GP (general purpose) čija su svojstva detaljnije opisana u prethodnom poglavlju.

Kao indikator prostorne rezolucije korišten je duplex indikator prema normi EN 462-5.



Slika 7.5 – Duplex indikator prema normi EN 462-5 [12]

Indikator sadrži 13 elemenata, odnosno parova bakrenih žica. Prostorna rezolucija se određuje prema zadnjem vidljivom paru, odnosno paru kojeg je softverski moguće raspoznati, o čemu će biti više riječi u narednim poglavljima.

Tablica 7.1 Odgovarajuća prostorna rezolucija za odgovarajući element, prema EN 462-5

Element	Prostorna rezolucija, mm
13	0,05
12	0,065
11	0,08
10	0,1
9	0,13
8	0,16
7	0,2
6	0,25
5	0,32
4	0,4
3	0,5
2	0,63
1	0,8



Slika 7.6 – Slikovna ploča na koju je smješten ispitni uzorak i duplex indikator

Olovne folije su varirane na dvije razine, tj. debljine su bile 0,027 mm i 0,254 mm.

Vrijeme ekspozicije bilo je određeno iskustveno prema razini energije, te je iznosilo:

- 2 minute za 100 kV
- 1 minutu i 30 sekundi za 175 kV
- 1 minutu i 15 sekundi za 250 kV

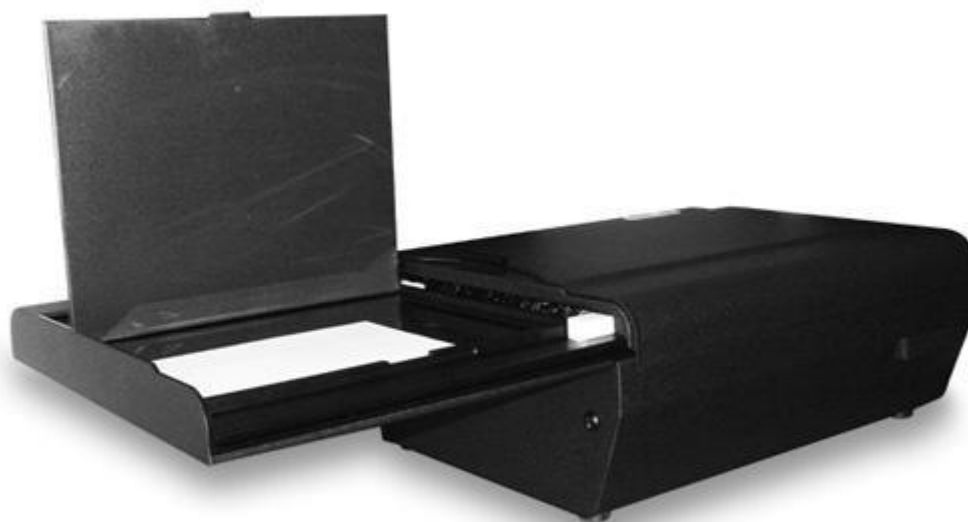
Plan pokusa prikazan je tablicom, u kojoj vrijednosti 1,2,3...15 označavaju redoslijed obavljanja snimanja.

Tablica 7.2 – Plan pokusa

Pozicija folije	Debljina folije	Napon rendgenske cijevi		
		100 kV	175 kV	250 kV
-	Bez folije	1	2	3
Sprijeda	0,027	6	5	4
	0,254	7	8	9
Straga	0,027	12	11	10
	0,254	13	14	15

7.2. Digitalizacija slikovnih ploča

Skeniranje slikovnih ploča, tj. digitalizacija je obavljena skenerom VMI 5100MS prikazanog slikom.



Slika 7.7 – Skener VMI 5100MS [13]

Specifikacije skenera dane su tablicom.

Tablica 7.3 – Specifikacije skenera VMI 5100MS [14]

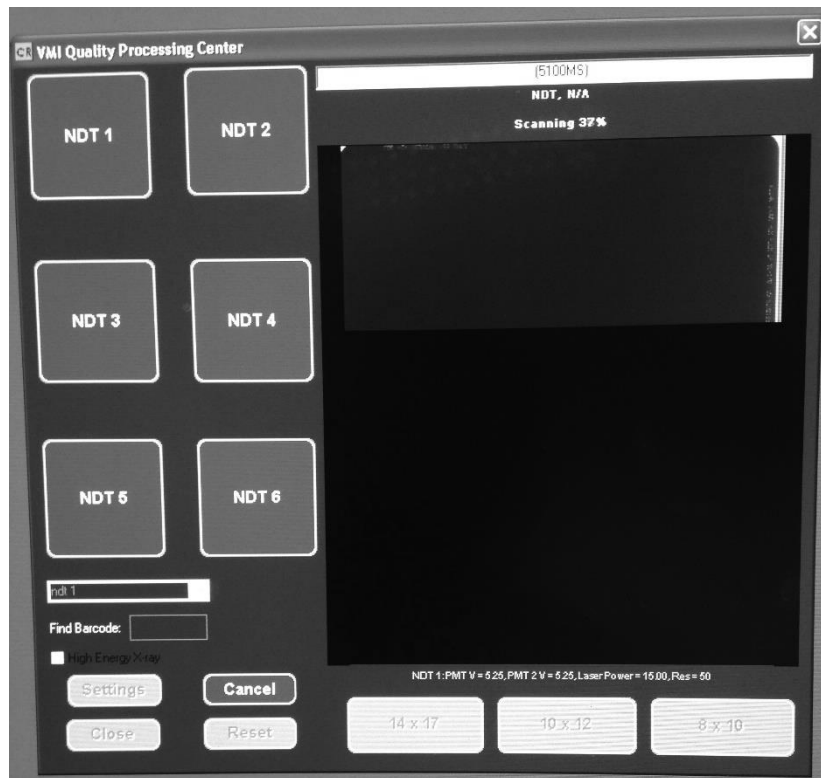
Izvor svjetlosti:	Laser dioda / fotomultiplikator
Dubina piksela:	65000 / 16 bitna datoteka
Veličina laserskog snopa:	50 μm do 200 μm (u koracima od 10 μm)
Proizvodnost:	Preko 60 slika na sat
Transportni mehanizam:	Jednostruki
Skeniranje / brisanje:	Automatsko, u jednom prolazu, ravno
Operacijski sustav:	Windows XP Professional
Napajanje:	100-240 V, 2,5A, 47-63 Hz
Mreža:	DICOM/DICONDE
Masa:	31,75 kg
Klasa:	Stolni skener

Postavke skenera bile su sljedeće:

- napon fotomultiplikatora 5,25V
- specifična energija lasera 15 J/m²
- rezolucija 50 μm

Monitor računala za pregledavanje slika bio je dijagonale 20,8 inča, visoke rezolucije (2048x1536) s 10 bitnim prikazom (1024 nijanse sive boje) kako bi se što jasnije mogla raspoznati eventualna nesukladnost u snimkama.

Slike su putem softvera Starrview pohranjene kao TIFF datoteke (Tagged Image File Format) što znači da nije bila upotrijebljena nijedna vrsta kompresije slike čime su sačuvani svi detalji proizašli iz skeniranja. Dodatno su za analizu odnosa signal-šum, slike spremljene i u posebnom, XRY formatu koji je također format bez kompresije slike.



Slika 7.8 – Softver za skeniranje slikovne ploče prilikom skeniranja

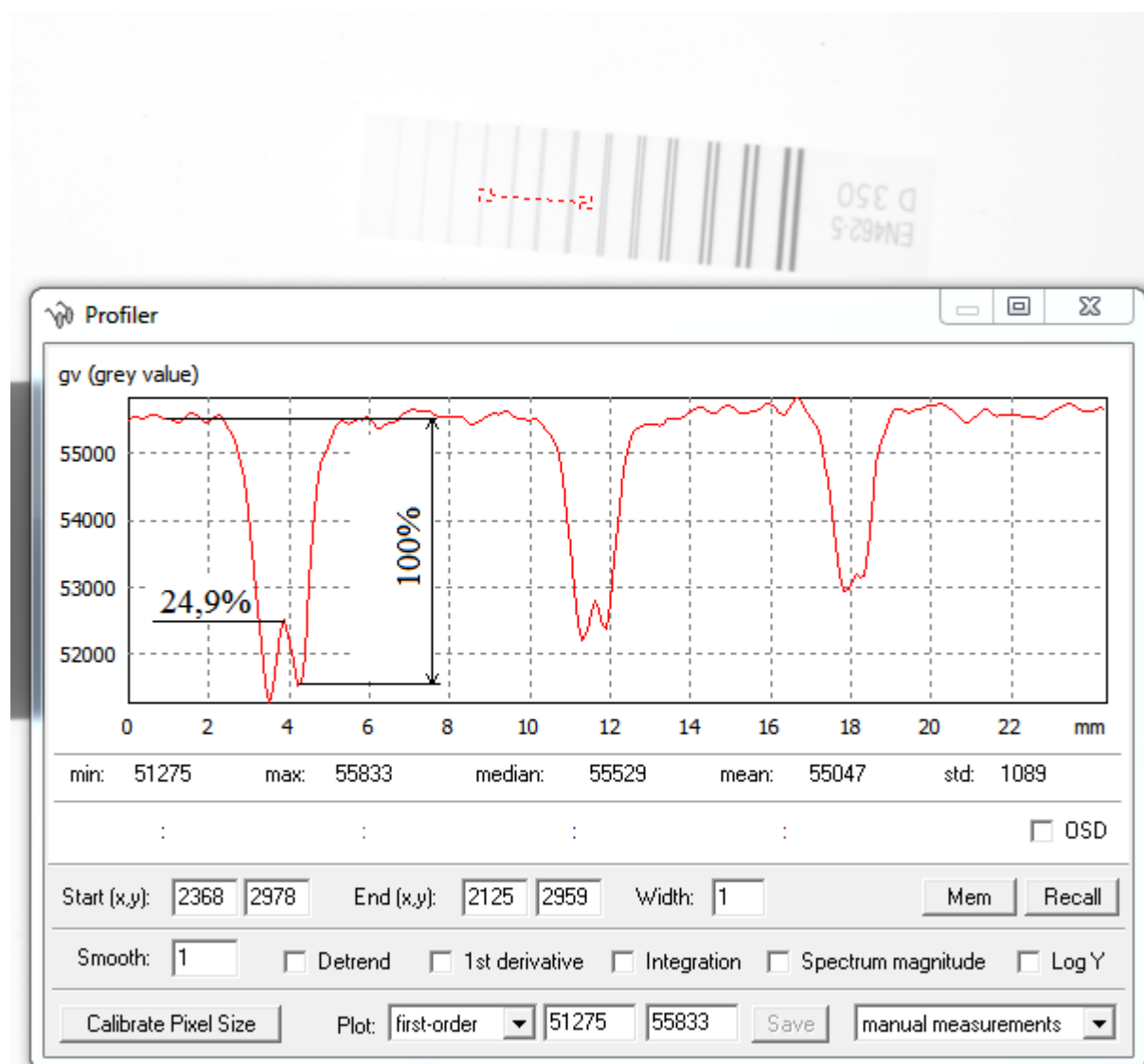
7.3. Način analize radiograma

Kako bi se odredila kvaliteta radiograma, tj. kvaliteta dobivene snimke, kao kriterij uzeti su kontrast, prostorna rezolucija i omjer signal-šum. Kontrast je jednostavno kvantificiran kao omjer između intenziteta piksela na dobivenoj slici, a prostorna rezolucija je kvantificirana pomoću već spomenutog duplex indikatora. Omjer signal-šum određen je pomoću specijaliziranog softvera StarrPlot.

Analiza slika u slučaju određivanja kontrasta i prostorne rezolucije obavljena je uz pomoć ISee! softvera verzije 1.11.1 koji je specifično namijenjen za analizu 16-bitnih slika s nijansama sive boje. Razvijen je na Institutu za razvoj i testiranja materijala (BAM) u Njemačkoj od strane Radne grupe za digitalnu radiologiju i analizu slika.

7.3.1. Određivanje prostorne rezolucije

Određivanje prostorne rezolucije je obavljeno na način da se „profiler“ alatom u softveru ISee! povukla linija preko duplex indikatora, te se iz dobivenog profila „grey“ vrijednosti tražila granična vrijednost utora koji označava razmak između dvije bakrene žice na indikatoru. Kada se našao određeni element čiji je utor u profilu bio u rasponu od 20 do 30%, on se proglasio referentnim (n) i očitavala se vrijednost prostorne rezolucije iz tablice duplex indikatora za $n+1$. Primjer je dan slikom:



Slika 7.9 – Određivanje prostorne rezolucije radiograma

7.3.2. Određivanje kontrasta

Kontrast je također određivan uz pomoć softvera ISee!, mjerenjem medijana intenziteta piksela.

$$K = \frac{I_0}{I_p}$$

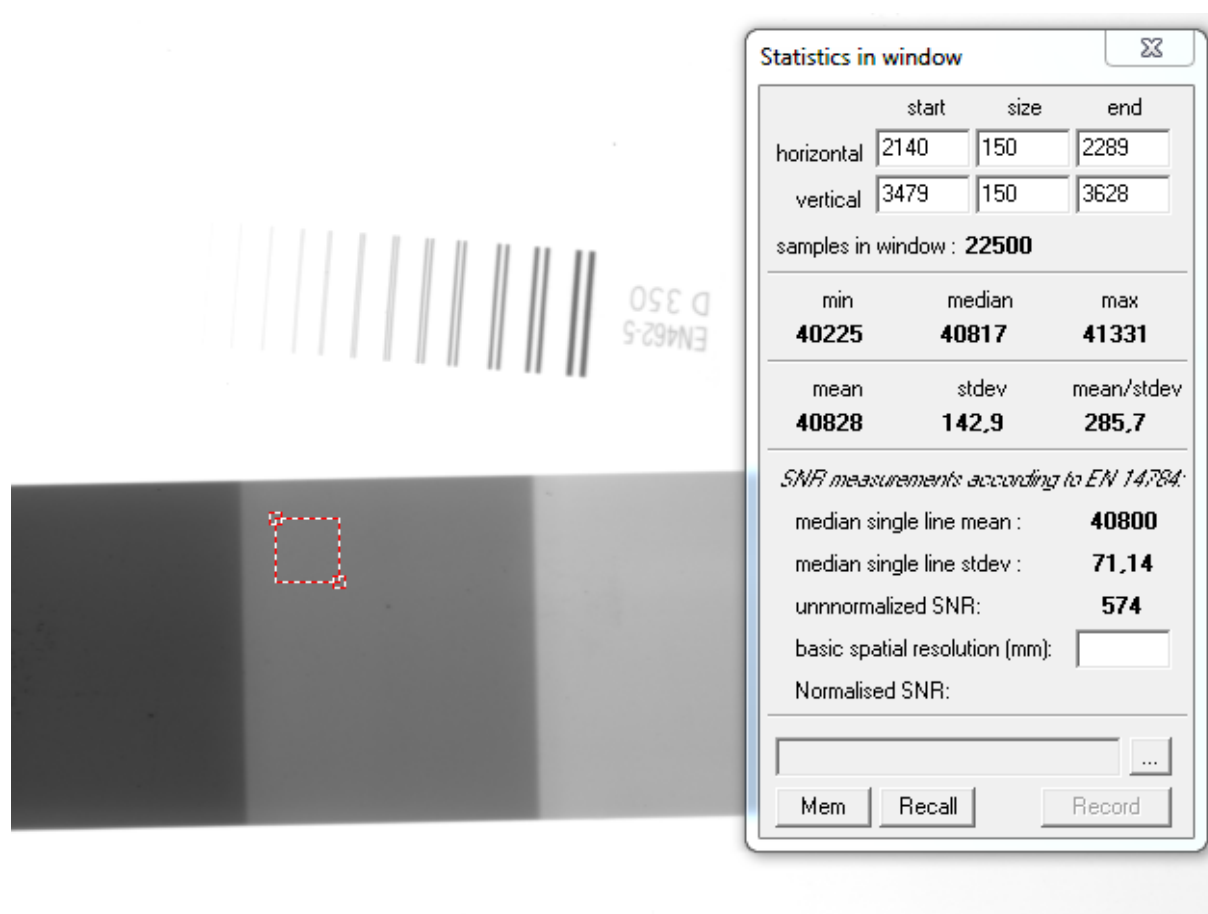
Gdje su:

I_0 – intenzitet piksela na ploči

I_p – intenzitet piksela na uzorku

K – kontrast

Konkretan postupak je prikazan slikom:

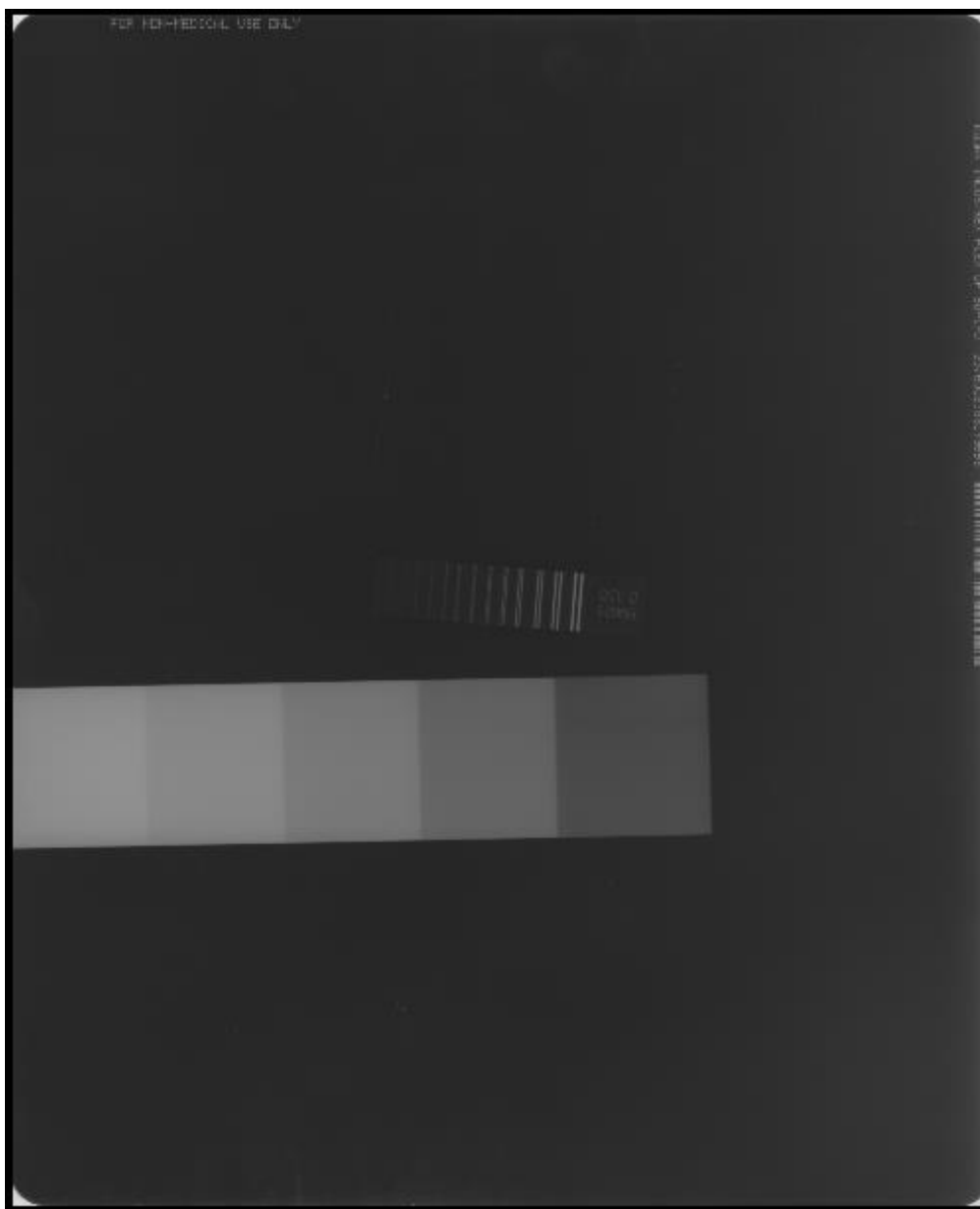


Za određivanje intenziteta piksela na ploči korišten je prostor veličine 300x300 piksela, dok je za određivanje intenziteta piksela na uzorku korišten prostor veličine 150x150 piksela koji je bio mjeren 3 puta te je kao relevantna uzeta srednja vrijednost. Izvršena su 3 mjerenja intenziteta na uzorku zbog mogućeg utjecaja nesavršenosti (ogrebotina, rupičastih oštećenja) na rezultat mjerenja. U tablici s rezultatima ta 3 mjerenja nose naziv: I_{p-1} , I_{p-2} i I_{p-3} .

7.3.3. Određivanje odnosa signal-šum (SNR)

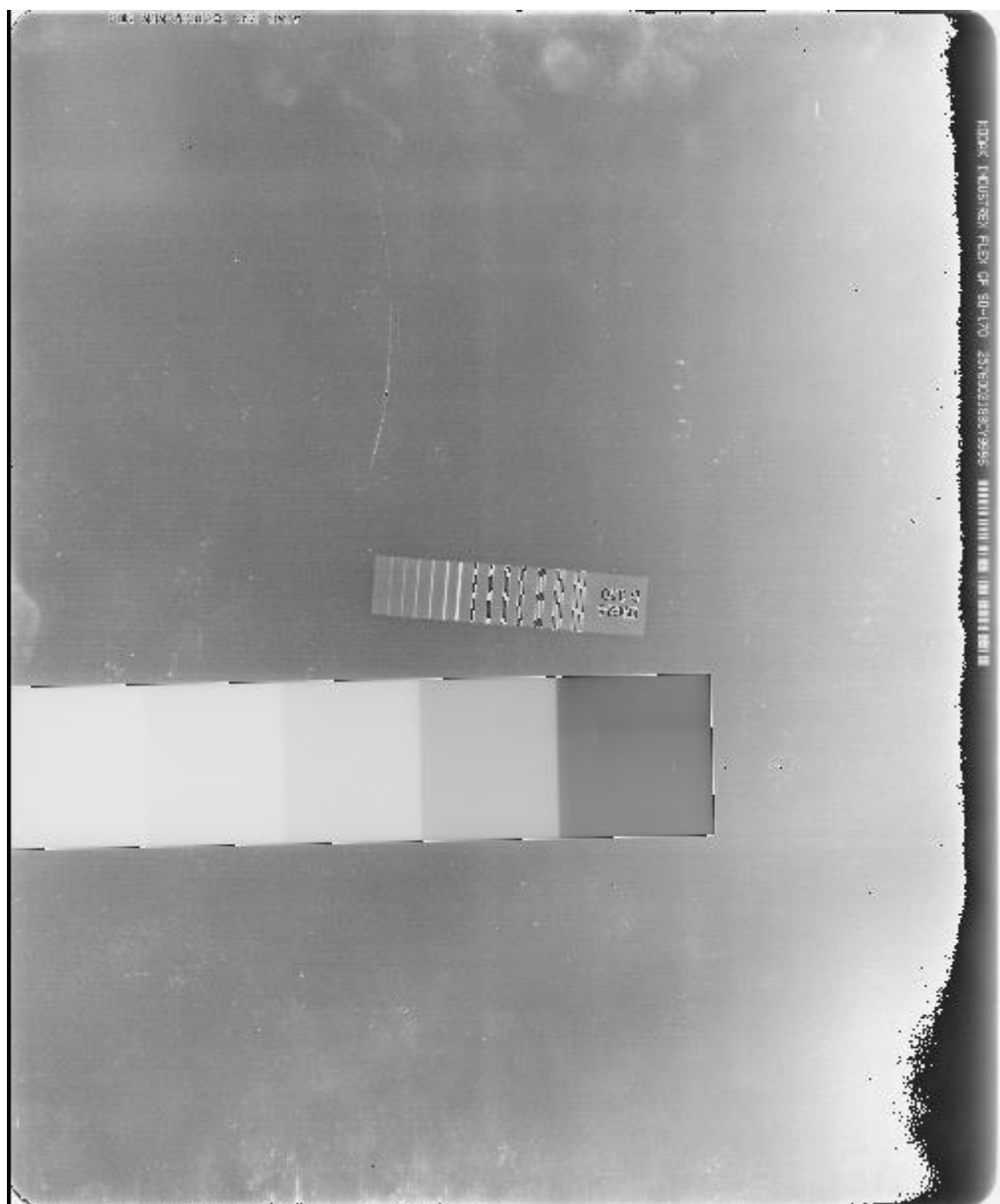
Odnos signal-šum bio je određen uz pomoć softvera „StarrPlot“ (inačica 1.8) koji je izrađen od strane proizvođača korištenog skenera za očitavanja slikovnih ploča. Skener ima logaritamsku prijenosnu funkciju, te je bilo nužno koristiti takav, specijalizirani softver, s obzirom da prije spomenuti ISee! nema tzv. „look-up“ tablice za korišteni skener; kojima bi bilo moguće linearizirati sliku.

Prvo je bilo potrebno učitati nelineariziranu sliku u XRY formatu koji poput TIF formata garantira očuvanje kvalitete slike.



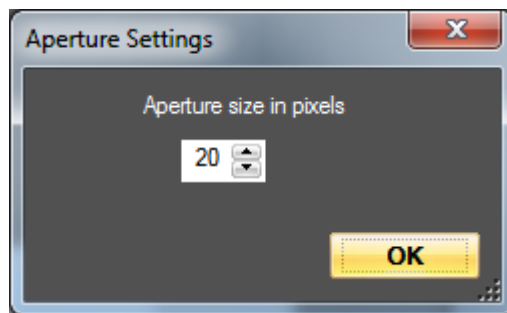
Slika 7.10 – Primjer nelinearizirane slike

Tada je uz pomoć softvera sliku bilo potrebno obraditi, tj. linearizirati i invertirati (prema uputama proizvođača skenera).



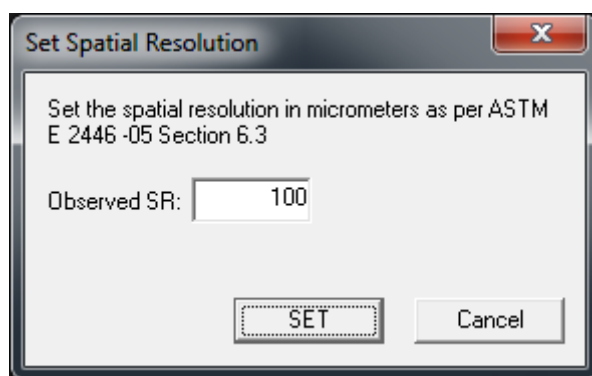
Slika 7.11 – Linearizirana i invertirana slika

Nakon što je slika linearizirana i invertirana, pristupilo se upisivanju vrijednosti aperture skeniranja (20 piksela, prema uputama proizvođača).



Slika 7.12 – Upisivanje vrijednosti aperture

Nakon što je postavljena vrijednost od 20 piksela za aperturu, bila je upisana vrijednost prostorne rezolucije za sliku (u mikrometrima), koja je prethodno izmjerena.



Slika 7.13 – Upisivanje podatka za prostornu rezoluciju

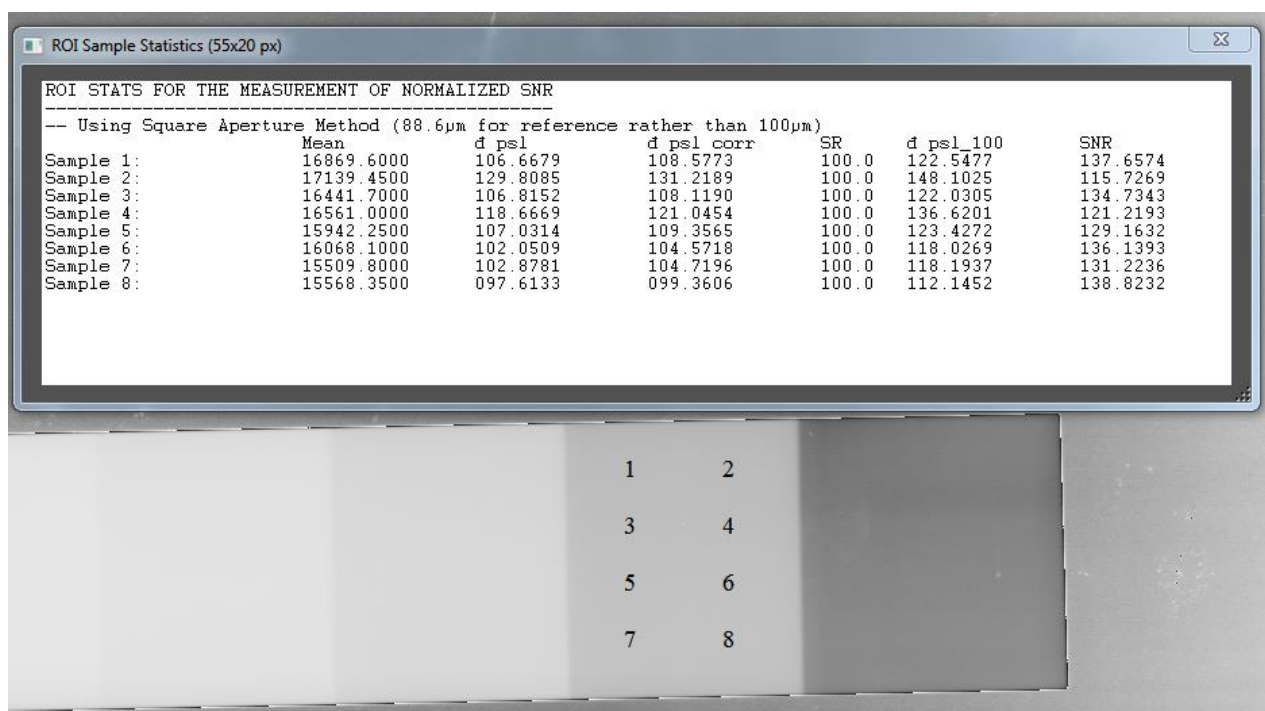
Nakon što je slika bila linearizirana, i nakon što je softver imao sve podatke vezane uz promatranu sliku, pristupilo se analizi odnosa signal-šum. Korištena je značajka softvera koja je posebno predviđena za takvo mjerenje. Prilikom svakog mjerenja bilo je uzeto 8 neovisnih uzoraka sa slike (mjerenja M1...M8 u pripadajućoj tablici) s odgovarajućeg mjesta na radiografskom zapisu (ovisno o korištenoj energiji). Uzeto je više uzoraka sa slike kako ne bi eventualne nesavršenosti utjecale na krajnji rezultat; koji je izračunat kao srednja vrijednost tih 8 mjerenja. Slika postupka, primjer rezultata i mjesta koja su odabrana za mjerenje prikazana su na slici; na sljedećoj stranici.

$$SNR = \frac{\sum M_i}{8} \text{ (uz } i = 1 \dots 8)$$

Gdje su:

SNR —odnos signal-šum

M_i —odgovarajući uzorak sa slike



Slika 7.14 – Prikaz mjerenja odnosa signal-šum

7.4. Rezultati mjerenja i analize snimaka

Analiza radiograma obavljena je prema postupcima prikazanim i rastumačenim u prethodnom poglavlju. Rezultati su upisani tablično i, preglednosti radi, podijeljeni u tri odvojene tablice koje odgovaraju trima korištenima razinama zračenja. Rezultati mjerenja za odnos signal-šum su prikazani odvojenim tablicama zbog velike količine podataka.

Tablica 7.4 – Rezultati kontrasta i rezolucije za 100 kV

Napon rendgenske cijevi: 100 kV								
Pozicija folije:	Debljina folije (mm)	BSR (mm)	I ₀	I _{p-1}	I _{p-2}	I _{p-3}	I _{p-srednji}	Kontrast
S prednje strane	0,027	0,1	39026	24914	25058	25741	25237,67	1,546339
	0,254	0,1	29339	19031	19119	19619	19256,33	1,523603
Sa stražnje strane	0,027	0,1	42281	28268	28095	28372	28245	1,496938
	0,254	0,08	42351	27520	27798	27283	27533,67	1,538153
Bez folije		0,16	55765	40817	39839	39900	40185,33	1,387695

Tablica 7.5 – Rezultati odnosa signal-šum za 100 kV

Napon rendgenske cijevi: 100 kV										
Pozicija folije:	Folija (mm)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	SNR
Prednja strana	0,027	113,0	120,3	115,9	122,9	111,3	119,5	122,7	124,0	118,7
	0,254	104,4	110,4	100,9	115,4	113,4	87,8	117,0	111,0	107,5
Stražnja strana	0,027	130,2	122,9	124,6	121,1	118,1	125,5	133,9	129,5	125,7
	0,254	144,9	147,4	130,3	159,7	157,6	159,0	154,4	124,5	147,2
Bez folije		77,2	81,3	72,9	89,4	72,7	77,0	81,4	81,1	79,1

Tablica 7.6 – Rezultati kontrasta i rezolucije za 175 kV

Napon rendgenske cijevi: 175 kV								
Pozicija folije:	Debljina folije (mm)	BSR (mm)	I ₀	I _{p-1}	I _{p-2}	I _{p-3}	I _{p-srednji}	Kontrast
S prednje strane	0,027	0,13	57376	43243	42964	43130	43112,33	1,330849
	0,254	0,1	57243	39252	39228	39272	39250,67	1,458396
Sa stražnje strane	0,027	0,1	55751	40991	40772	40978	40913,67	1,36265
	0,254	0,1	54749	36733	36638	36673	36681,33	1,492558
Bez folije		0,1	53065	39851	40060	40172	40027,67	1,325708

Tablica 7.7 – Rezultati odnosa signal-šum za 175 kV

Napon rendgenske cijevi: 175 kV										
Pozicija folije:	Folija (mm)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	SNR
Prednja strana	0,027	98,7	98,2	120,8	97,5	116,4	109,3	127,9	116,3	110,6
	0,254	130,2	141,2	113,9	153,2	155,4	139,6	157,9	146,4	142,2
Stražnja strana	0,027	146,6	154,3	154,3	147,4	176,1	179,0	172,8	160,3	161,4
	0,254	181,0	160,5	204,7	183,3	191,1	205,0	176,9	210,8	189,2
Bez folije		157,2	145,7	166,2	159,1	161,7	157,0	148,3	154,7	156,3

Tablica 7.8 – Rezultati kontrasta i rezolucije za 250 kV

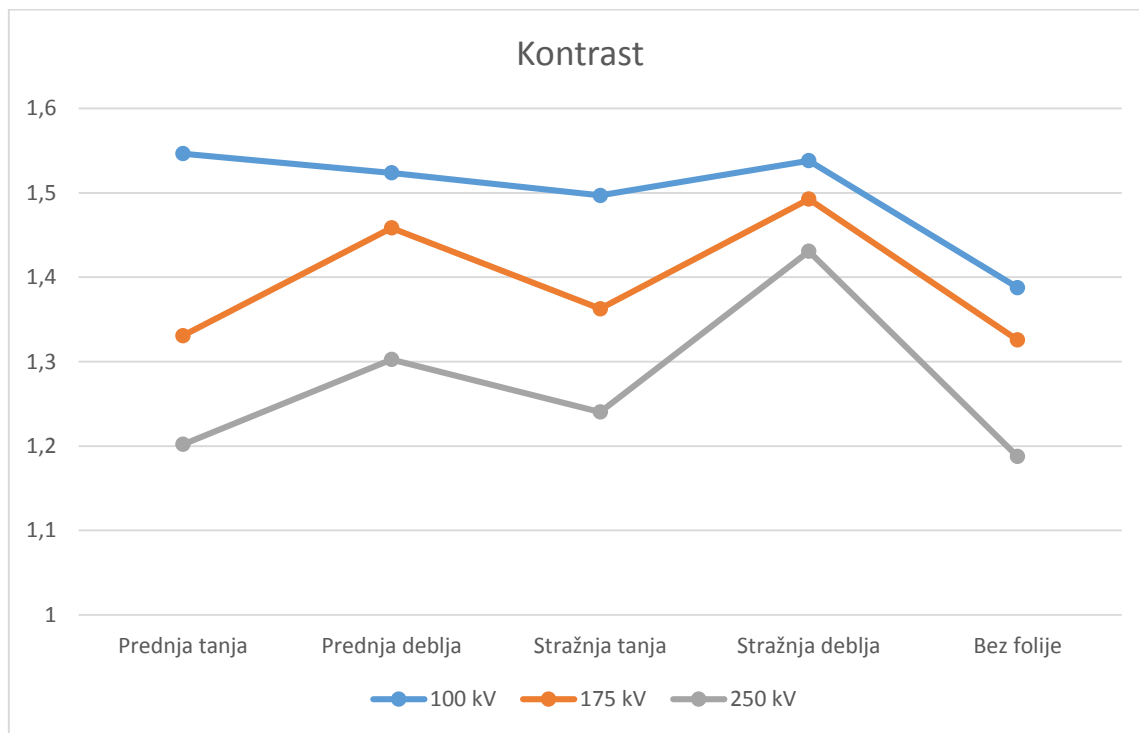
Napon rendgenske cijevi: 250 kV								
Pozicija folije:	Debljina folije (mm)	BSR (mm)	I ₀	I _{p-1}	I _{p-2}	I _{p-3}	I _{p-srednji}	Kontrast
S prednje strane	0,027	0,1	55749	46361	46397	46373	46377	1,202083
	0,254	0,13	57385	44199	43956	44022	44059	1,302458
Sa stražnje strane	0,027	0,1	55513	44797	44636	44841	44758	1,240292
	0,254	0,1	55066	38484	38398	38588	38490	1,430657
Bez folije		0,1	54841	46297	46375	45862	46178	1,1876

Tablica 7.9 - Rezultati odnosa signal-šum za 250 kV

Napon rendgenske cijevi: 250 kV										
Pozicija folije	Folija (mm)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	SNR
Prednja strana	0,027	159,8	158,0	150,7	177,2	161,7	160,4	162,6	151,3	160,2
	0,254	103,8	112,5	96,8	100,8	97,7	110,3	111,3	109,3	105,3
Stražnja strana	0,027	169,2	157,9	150,3	153,3	183,4	168,0	155,7	146,0	160,5
	0,254	196,7	200,5	206,1	230,1	204,5	258,2	195,3	242,9	216,8
Bez folije		167,3	168,6	168,6	140,4	170,0	180,1	145,1	183,1	165,4

7.4.1. Analiza rezultata kontrasta

Zbog lakše mogućnosti predočavanja rezultata, vrijednosti kontrasta su prikazane grafikonom za sve 3 razine zračenja.



Slika 7.15 – Grafikon kontrasta

Na osnovu grafičkog prikaza, jasnije se može razlučiti utjecaj parametara na kontrast.

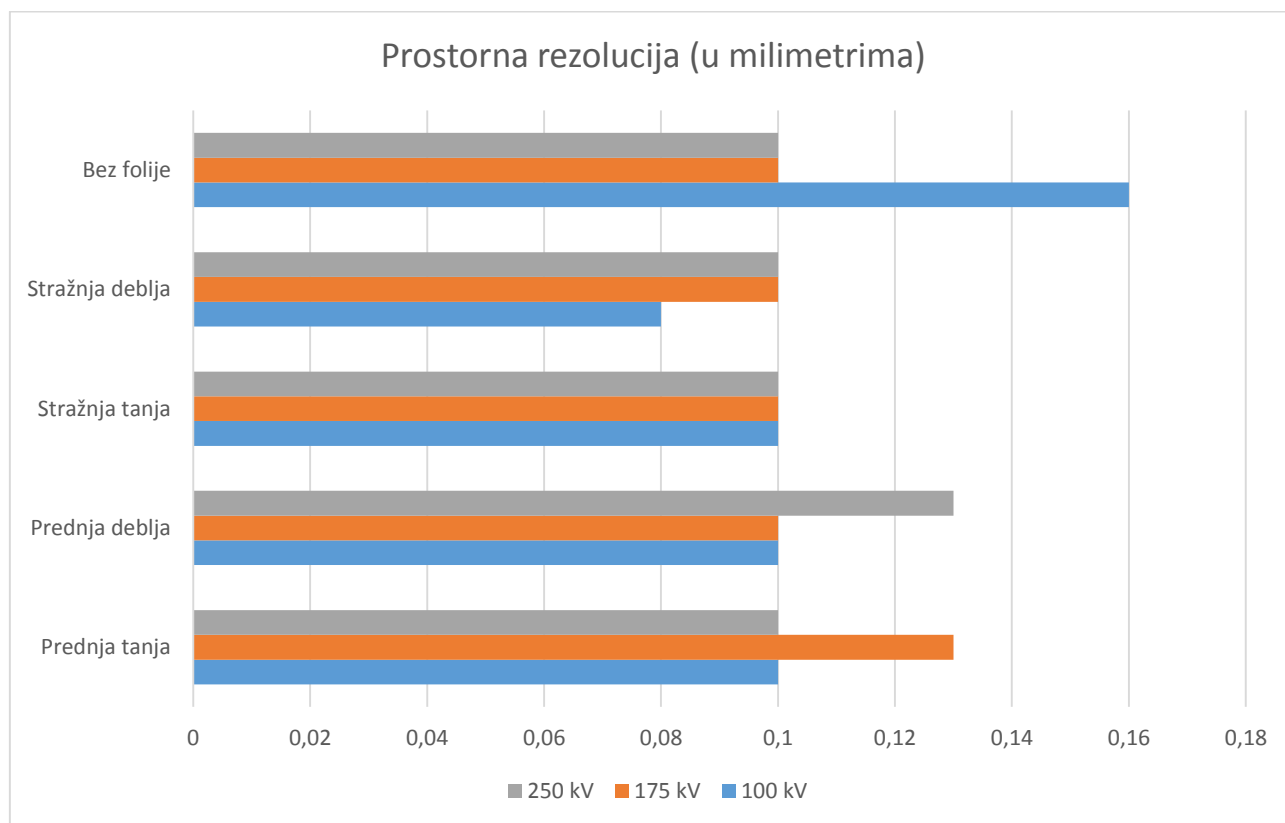
Pri najnižoj razini zračenja (100 kV), jasno je da je bez folije mnogo slabiji kontrast. No, istovremeno se na toj razini zračenja ne može jasno ustvrditi da je deblja folija bolja od tanje, ili obrnuto. Pri 175 i 250 kV se već uočava trend koja ukazuje na to da je kontrast bolji s debljom folijom (bez obzira na njenu poziciju). Također, na ovim razinama zračenja nema velike razlike u kontrastu u slučaju da se slikovnu ploču upotrebljava bez folije ili s tanjom folijom.

Što se smještaja folije tiče, iz rezultata se može razlučiti da je bolji kontrast kada je folija smještena iza slikovne ploče (gledano za istu debljinu folije).

Naposljetku, prema dobivenim podacima, može se zaključiti da je kontrast bolji što je niža razina energije, i da je razlika u kontrastu između energija zračenja najmanja pri upotrebi deblje folije smještene iza slikovne ploče. Imajući to na umu, može se zaključiti da je kombinacija deblje folije smještene iza slikovne ploče optimalna za radiografski kontrast.

7.4.2. Analiza rezultata prostorne rezolucije (BSR)

Također, kao što je bio slučaj s kontrastom, rezultati mjerenja prostorne rezolucije prikazani su (ovog puta stupčastim) grafikonom iz kojeg se mogu lakše izvući zaključci.

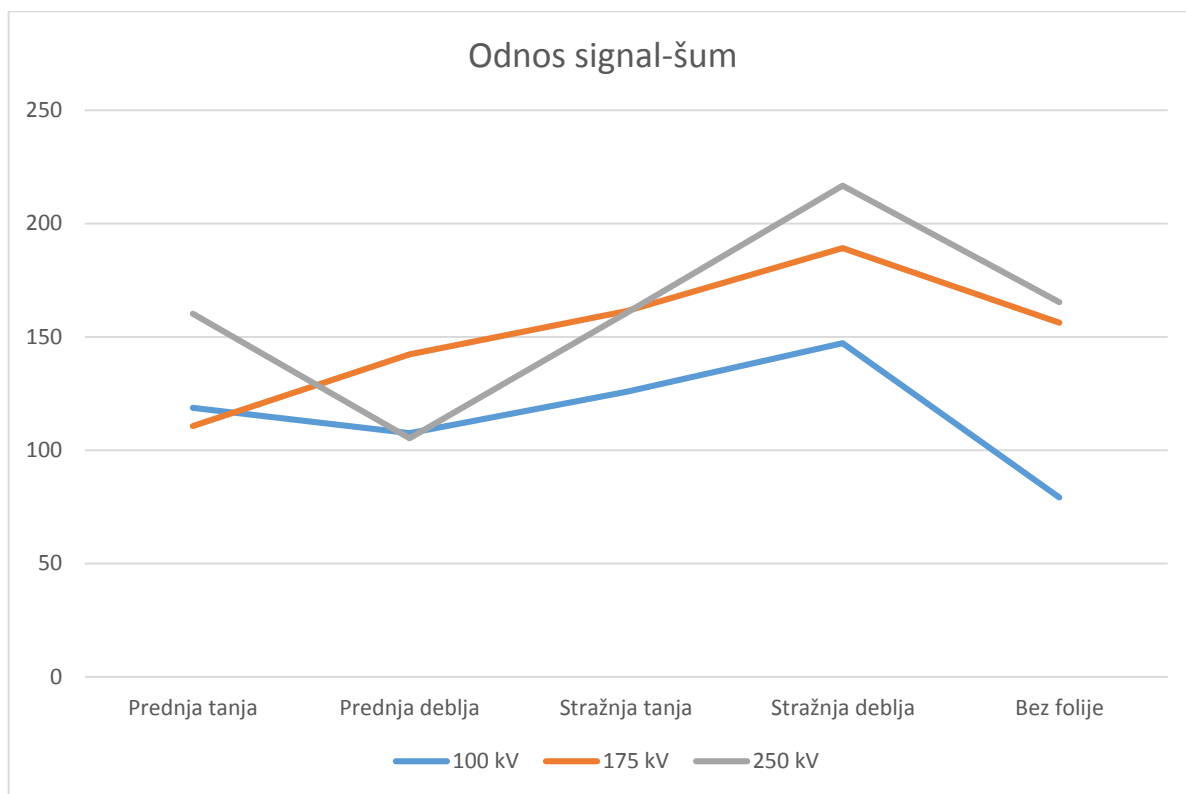


Slika 7.16 – Stupčasti dijagram prostorne rezolucije

Iz dobivenog grafičkog prikaza moguće je zaključiti da nema jasnog trenda između rezultata prostorne rezolucije za korištene razine pokusa, izuzev situacije kada se folije ne koriste. U tome slučaju, jasno je da najmanju prostornu rezoluciju ima najniža razina zračenja. Upotrebom folija, teško je iz rezultata pronaći neki jasan trend, te se zaključuje da ga nema.

7.4.3. Analiza rezultata odnosa signal-šum

Kao i za prostornu rezoluciju i kontrast, tako su i za odnos signal-šum podaci prikazani grafički kako bi bilo lakše razlučiti efekte koje na tu veličinu imaju različite energije zračenja i različite debljine olovnih folija.



Slika 7.17 – Grafički prikaz odnosa signal-šum

Može se zamijetiti da je odnos signal-šum najveći na sve tri razine energija kada se koristi deblja folija sa stražnje strane slikovne ploče. Gledano sa stajališta napona, odnosno razine energija, najveći odnos signal-šum u skoro svakom slučaju postiže se višim naponom, odnosno većom energijom. Prema slici se isto tako može zaključiti da napon od 100 kV daje najnižu razinu odnosa signal-šum, te da je porastom napona taj odnos sve povoljniji.

Jedina anomalija je slučaj kada je s prednje strane deblja folija, jer tada inače po svim drugim slučajevima superioran napon od 250 kV rezultira slabim odnosom signal-šum.

8. Optimalne kombinacije olovnih folija

Uzimajući u obzir kvantitativne pokazatelje kvalitete slike (kontrast, rezoluciju i odnos signal-šum) radiografskog zapisa, i shodno tome njihove izmjerene vrijednosti mogu se izdvojiti optimalne kombinacije olovnih folija, kako slijedi:

- 1) Pri 100 kV – deblja folija (0,254 mm) sa stražnje strane
 - a. Ova kombinacija rezultira kontrastom od 1,538, rezolucijom od 0,08mm i odnosom signal-šum od 147,2.
 - b. Kombinacija tanje folije (0,027 mm) s prednje strane daje nešto bolji kontrast (1,546), ali za stepenicu manju prostornu rezoluciju i dosta lošiji odnos signal-šum (118,7) pa se može reći da su ove dvije kombinacije po nekim parametrima vrlo blizu, ali da je i dalje prvo izabrana kombinacija bolja.
- 2) Pri 175 kV – deblja folija (0,254 mm) sa stražnje strane
 - a. Ovdje je optimalna kombinacija po sva tri parametra kvalitete slike bolja od ostalih kombinacija, ali je blizu s nijansom slabijim kontrastom (1,458 u odnosu na optimalnih 1,492) i istom prostornom rezolucijom - kombinacija s debljom folijom s prednje strane koja ipak ima dosta nepovoljan odnos signal-šum (142,2 s obzirom na optimalnih 189,2).
- 3) Pri 250 kV – deblja folija (0,254 mm) sa stražnje strane
 - a. U ovom slučaju je ova kombinacija daleko ispred svih ostalih sva tri parametara te se sa sigurnošću i bez dvojbe može smatrati optimalnom.

9. Zaključak

Računalna radiografija se pokazala kao vrlo efikasnim i brzim postupkom za dobivanje eksperimentalnih rezultata. Njezina jednostavnost prvenstveno leži u tome što se uz tradicionalnu opremu (izvor zračenja) i noviji tip medija (slikovne ploče) može generirati digitalni radiografski zapis koji ima brojne prednosti. One su se očitovale prvenstveno u fazi analize eksperimenta, gdje je bilo moguće sačuvati slikovne zapise kao digitalne, te ih prenositi i analizirati na bilo kojem računalu koje ima odgovarajući softver, što se ne može reći za tradicionalni radiografski film. S obzirom na digitalnu prirodu ovakvih snimaka, pokazalo se da je moguće dobiti točne pokazatelje o kvaliteti zapisa u ovisnosti o parametrima pokusa. S obzirom na sve navedeno, ali i činjenicu da je slikovnu ploču za digitalnu radiografiju moguće iskoristiti nekoliko tisuća puta (što je daleko ekonomičnije od filma), može se zaključiti da je računalna radiografija postupak koji će (uz digitalnu radiografiju) s daljnjim razvojem slikovnih ploča možda i potpuno istisnuti tradicionalnu radiografiju s filmom.

S obzirom na provedena ispitivanja i dobivene rezultate, na kraju je moguće zaključiti da olovne folije imaju itekako mjerljiv utjecaj na kvalitetu digitalnog radiografskog zapisa. Upotrebom debljih folija dobiveni su zapisi istaknuto boljih rezultata kvalitete slike (primarno kontrasta i odnosa signal-šum), ali i ovisno o slučaju i prostorne rezolucije. Kao smjernicu za buduća istraživanja, valjalo bi istražiti do koje razine bi povećanje debljine olovni folija imalo pozitivan efekt na kvalitetu radiografskog zapisa.

10. Literatura

- [1] Busse, T.;
<http://whs.wsd.wednet.edu/faculty/busse/mathhomepage/busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter7/chapter7.html>.
Posljednji put pristupano: 20.6.2014.
- [2] Generalić, E;
http://www.periodni.com/gallery/spektar_elektromagnetskog_zracenja.png.
Posljednji put pristupano: 20.6.2014.
- [3] General Electric Corporation, Industrial Radiography - Image Forming Techniques, 2007.
- [4] Batchelor, B. G.; Machine Vision Handbook, London: Springer Verlag, 2012.
- [5] Wikipedia, the free encyclopedia
<http://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>; posljednji put pristupano: 20.6.2014.
- [6] <http://www.edilex.fi/content/stuklex/kuvat/ST5-6app2.gif>.
Posljednji put pristupano: 20.6.2014.
- [7] Eastman Kodak Company, Radiography in Modern Industry, New York, 1980.
- [8] Zscherpel, E.; »Computed Radiography,« u *INDE 2007*, Kalpakkam, India, 2007.
- [9] »Kodak Industrex Digital Systems,«
http://www.kodak.com/global/en/business/aiminfo/flash/industrex_demo2006/Industrex_Demo_web.swf. Posljednji put pristupano: 20.6.2014.
- [10] University of Arizona, »Digital Radiography,«
<http://atlas.physics.arizona.edu/>.
Posljednji put pristupano: 20.6.2014.
- [11] Carestream Health, Inc., »Technical Data / Non-destructive Testing,« u *CARESTREAM INDUSTREX Digital Imaging Plates*, Rochester, New York, Kodak Publication No. TI-2632, 2013.
- [12] Springer, Handbook of Technical Diagnosis, Berlin: Springer, 2013.
- [13] <http://www.ndt-ed.org>.
Posljednji put pristupano: 20.6.2014.